Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Alexandre Esperança Sepúlveda da Silva

Optimização do comportamento dos sistemas de ligação nas barreiras de protecção das estradas

Outubro de 2011

Optimização do comportamento dos sistemas de ligação nas barreiras de protecção das estradas

Bruno Alexandre Esperança Sepúlveda da Silva

UMinho | 2011

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Alexandre Esperança Sepúlveda da Silva

Optimização do comportamento dos sistemas de ligação nas barreiras de protecção das estradas

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Mecânica

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor José Filipe Bizarro de Meireles

Outubro de 2011

DECLARAÇÃO

Nome: Bruno Alexandre Esperança Sepúlveda da Silva

Endereço electrónico: baess@sapo.pt   Telefone: 00351 916763223

Número do cartão do cidadão: 13180045

Título dissertação: **Optimização do comportamento dos sistemas de ligação nas barreiras de protecção das estradas**

Orientador: Professor Doutor José Filipe Bizarro de Meireles

Ano de conclusão: 2011

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:
Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha dissertação, no todo ou em parte, em suporte digital.

Declaro que autorizo a Universidade do Minho a arquivar mais de uma cópia da dissertação e a, sem alterar o seu conteúdo, converter a dissertação entregue, para qualquer formato de ficheiro, meio ou suporte, para efeitos de preservação e acesso.

Retenho todos os direitos de autor relativos à dissertação, e o direito de a usar em trabalhos futuros (como artigos ou livros).

Concordo que a minha tese ou dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto:

- Disponibilização imediata do conjunto do trabalho para acesso mundial

Universidade do Minho, 31/10/2011

Assinatura: ____

À minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Não podia deixar de agradecer a todos os que me ajudaram ou apoiaram em mais uma etapa de aprendizagem, que antecede o há muito esperado mercado de trabalho:

Professor Doutor José Filipe Bizarro de Meireles pelo apoio, orientação, esclarecimentos prestados e material bibliográfico disponibilizado durante todo o projecto.

Professor Doutor Nuno Peixinho por todos os esclarecimentos prestados ao longo do projecto.

Professor Doutor Pimenta Claro, pela criação deste projecto, e por apoio bibliográfico prestado.

Professor Doutor Delfim Soares pela análise química gratuita do material traccionado.

Professora Doutora Cândida Vilarinho pelos esclarecimentos e bibliografia prestada.

Fernando Araújo pela ajuda prestada durante a realização dos ensaios experimentais.

Vítor Neto pela maquinagem efectuada com vista à produção de provetes para os ensaios experimentais.

À minha mãe por todo o apoio, a todos os níveis, ao longo de toda a minha vida.

Aos meus avós pelo apoio prestado ao longo dos anos.

Ao meu pai pelo incentivo prestado.

Ana Gameiro da Silva, por ter sido ao longo de três anos e meio, o catalisador de todos os meus sucessos.

Carlos Mendes, pela amizade e por ter sido ao longo destes anos de educação superior uma presença constante no dia-a-dia, nos bons e maus momentos.

João Tavares pela entreajuda devido ao facto de ter sido um parceiro deste mesmo projecto, embora com outro enfoque.

Marco Dourado por esclarecimentos de nível prático e do artigo presente neste trabalho.

Luís Farias pela amizade e apoio prestado.

José Gomes e Humberto Gonçalves pela partilha de sentimentos positivos e negativos ao longo dos nossos respectivos projectos, da mesma especialização, que decorreram no mesmo intervalo de tempo, e pela amizade.

A todos os meus amigos pelo apoio manifestado.

A todos aqueles que não mencionei mas intervieram directa ou indirectamente na elaboração deste projecto.

RESUMO

A presente tese de mestrado expõe o estado da arte das barreiras de protecção rodoviária, com incidência mais profunda nas barreiras metálicas mais usuais, área de estudo deste trabalho.

De modo a executar uma análise fidedigna, é descrita previamente a curva do material, obtida experimentalmente, que posteriormente é tratada de modo a obter a curva verdadeira do material para introdução no programa.

As análises executadas são de cariz estático, estudando de forma individual estes dois elementos. Como se pretende verificar o comportamento plástico das mesmas, o estudo numérico recorre ao programa *ANSYS* que permite o estudo não-linear e plástico nas suas análises.

Neste trabalho são executadas análises das ligações (prumo e espaçador) das barreiras de protecção rodoviária com vista ao entendimento do seu comportamento de deformação, comparando dois tipos de perfis, o UPN120 e o C125, retirando por fim as equações que descrevem o comportamento das diferentes estruturas, de modo a poder aplicar as análises numéricas a casos reais de colisão.

ABSTRACT

The present master degree dissertation exhibits the state of the art of the road safety barriers with special focus in the most usual metallic barriers, subject area of this work.

In order to perform a realistic analysis, it is done an experimental test to obtain the stress-strain curve, which will be treated so the true stress-strain curve can be obtained in order to introduce it in the software.

The analyses performed are static, and the two structures are independently analysed. In order to study the plastic behaviour in these structures, this work uses software that allows the non-linear and plastic behaviour in its analyses, the ANSYS.

In this work are performed connection analyses (post and spacer) of the road safety barriers in order to understand their deformation behaviour, comparing the two post types, the UPN120 and the C125, achieving the final formulation that describes its behaviour, in order to able to apply that formulation in real crash cases.

PALAVRAS-CHAVE

Análise estática não-linear

ANSYS

Barreiras de protecção rodoviária

Capacidade de contenção

Deformação plástica

EN 1317

Prumo

UPN120

C125

Espaçador

KEYWORDS

Non-linear static analysis

ANSYS

Road safety barriers

Containment capacity

Plastic deformation

EN 1317

Post

UPN120

C125

Spacer

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABELAS

NOMENCLATURA

Símbolo	Definição	Unidade
$d\varepsilon_{ij}^{p}$	Incrementos de extensão plástica	
[**B**]	Matriz de extensão-deslocamento	
{u}	Vector de deslocamentos	
{ε}	Vector de extensões	
α	Ângulo alfa	º
Δl	Variação de comprimento, alongamento	mm (m)
δW	Trabalho interno virtual	
ε	Extensão ou deformação	-
ε_c	Extensão ou deformação no ponto de tensão cedência do material	-
ε_e	Extensão ou deformação equivalente	-
ε_{El}	Extensão ou deformação elástica	-
ε_{eng}	Extensão ou deformação da curva de engenharia	-
ε_f	Extensão ou deformação total do material no instante anterior à fractura	-
ε_{fd}	Extensão ou deformação total do material dúctil no instante anterior à fractura	-
ε_{ff}	Extensão ou deformação total do material frágil no instante anterior à fractura	-
ε_{Pl}	Extensão ou deformação plástica	-
ε_r ; ε_R	Extensão ou deformação no ponto tensão de rotura do material	-
ε_T	Extensão ou deformação total	-
ε_v	Extensão ou deformação verdadeira	-

ε_x	Extensão ou deformação na direcção transversal ao ensaio (x)	-
ε_y	Extensão ou deformação na direcção transversal ao ensaio (y)	-
ε_z	Extensão ou deformação na direcção de tracção do ensaio (z)	-
ρ	Massa volúmica	Kg/m^3
σ	Tensão	MPa (Pa)
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais	MPa (Pa)
σ_c	Tensão de cedência	MPa (Pa); psi
σ_e	Tensão equivalente	MPa (Pa); psi
σ_{eng}	Tensão da curva de engenharia	MPa (Pa)
σ_{ij}	Tensor das tensões	
σ_{EM}	Tensão equivalente máxima	MPa (Pa)
σ_r ; σ_R	Tensão de rotura	MPa (Pa)
σ_v	Tensão verdadeira	MPa (Pa)
$\sigma_{v\text{-}e}$	Tensão verdadeira durante a estricção	MPa (Pa)
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Tensões nos eixos x, y, z.	MPa (Pa)
τ	Tensão de corte	MPa (Pa)
τ_{max}	Tensão de corte máxima	MPa (Pa)
$(\tau_{oct})_{crítica}$	Tensão de corte octaedral crítica	MPa (Pa)
τ_{xy}	Tensão de corte normal ao plano xy	MPa (Pa)
τ_{yz}	Tensão de corte normal ao plano yz	MPa (Pa)
τ_{zx}	Tensão de corte normal ao plano zx	MPa (Pa)
υ	Coeficiente de *Poisson*	-
A	Área da secção transversal do provete	mm^2 (m^2)

A_0	Área da secção transversal inicial do provete	mm^2 (m^2)
b	Largura da secção da barra	mm (m)
C	Tensor de constituição do material	
d	Distância; deslocamento; deflexão	mm; m
D	Diferenciação	
d_H	Deslocamento horizontal	mm (m)
Du	Variação do deslocamento	mm (m)
d_V	Deslocamento vertical	mm (m)
E	Módulo de *Young*	GPa (Pa)
e	Tensor de deformação	
F	Força	N
G	Módulo de elasticidade transversal	GPa (Pa)
h	Altura de secção da barra	mm (m)
J_2	Segundo invariante das tensões	
k	Tensão limite de elasticidade em corte puro	MPa (Pa)
K	Constante de rigidez	MPa (Pa)
l/L	Comprimento	mm (m); in
l_0	Comprimento de referência inicial do provete	mm (m)
L1	Comprimento entre prumos (alternativa 1)	mm (m)
L2	Comprimento entre prumos (alternativa 2)	mm (m)
M	Momento	N.m; lbf.in
M_c	Momento de início de cedência do material	N.m; lbf.in
M_{lim}	Momento que origina a total plasticidade do material	N.m; lbf.in
n	Coeficiente de encruamento	-
R^2	Regressão da linha de tendência	

R_{al}	Rácio de alongamentos	-
S_b	Deflexão da barreira	m
u	Deslocamento no eixo dos xx	mm (m)
U_r	Módulo de resiliência	MPa (Pa)
U_T	Módulo de tenacidade	MPa (Pa)
V	Volume do corpo deformado	mm^3 (m^3)
v	Velocidade; deslocamento no eixo dos yy	m/s ; mm (m)
w	Deslocamento no eixo dos zz	mm (m)
W_d^e	Energia elástica de distorção por unidade de volume	

GLOSSÁRIO

ANSYS	Programa de simulação de engenharia.
A307A	Classe A do aço A307 segundo a ASTM.
Axissimétrica	Simétrica em relação a um eixo.
Barra longitudinal	Elemento longitudinal, com comprimento entre sensivelmente 2,3 metros e 4,3 metros que tem como função absorver a energia dos veículos em despiste, através da sua deformação e transferência de energia entre elementos semelhantes, e redireccionar os mesmos. Forma usual em W, dupla onda.
Barreira de betão híbrida	Constituída por mais que um elemento. Betão e aço neste caso.
Barreira *New Jersey*	Barreira de Betão.
Calandragem	Processo de conformação plástica para introdução de curvatura.
Celsius	Escala de temperatura relativa, medida em graus (º).
cos	Co-seno.

Cunha	Elemento para aplicação de deformação noutra estrutura.
Deflexão	Desvio em relação a um ponto inicial.
DesignModeler	Módulo de desenho da vertente gráfica *Workbench*, acedida através do ícone "*Geometry*".
Elasticidade	Deformação não definitiva.
Elemento de elevada ordem	Elemento com uma descrição por via do número de nós bastante completa. Número de nós varia com o tipo de elemento: sólido, casca, entre outros.
Espaçador	Elemento de ligação entre o prumo e a barra longitudinal das barreiras de protecção rodoviária.
Estricção	Deformação localizada. Diminuição de secção.
European Patent Office	Instituição Europeia de Patentes.
Extensão	Deformação. Adimensional.
Fe	Elemento químico Ferro.
Fe-360	Nome de um tipo de aço.
Hourglassing	Fenómeno associado à aparente perda de rigidez.
in	Polegada. Unidade de comprimento do sistema imperial.
Isotrópico	Semelhante comportamento em diferentes direcções.
J	Joule. Unidade de energia e trabalho do sistema internacional.
KEYOPT	Instrução de comando para a configuração de elementos do programa *ANSYS*.
kg	Unidade de massa.
km/h	Unidade derivada de Velocidade. Quilómetros por hora.
lbf	Libra de força. Unidade de força do sistema imperial.
LS-DYNA	Programa informático de execução de análises dinâmicas, desenvolvido pela Livermore Software Technology Corporation.

m	Metro, se representar uma unidade. Unidade de comprimento do sistema internacional.
Mechanical	Módulo de análise numérica da vertente gráfica *Workbench*.
Mechanical APDL	Vertente de comandos/programação do *ANSYS*.
mm	Milímetro. 10^{-3} m (metro).
Módulo de *Young*	Declive da recta de domínio plástico. Módulo de elasticidade.
MPa	Megapascal. 10^{6} Pa (Pascal). Unidade de pressão do sistema internacional.
Multilinear Isotropic Hardening	Endurecimento Isotrópico Multilinear. Opção que permite a descrição da curva de tensão-extensão verdadeira de um material isotrópico, pormenorizadamente.
N	Newton. Unidade de força do sistema internacional.
º	Grau.
Online	Disponível para acesso através da Internet.
Pa	Pascal. Unidade de pressão do sistema internacional.
Plasticidade	Deformação definitiva.
Prumo	Elemento de ligação ao solo das barreiras de protecção rodoviária.
psi	Libra por polegada quadrada. Unidade de pressão do sistema imperial.
Resiliência	Capacidade de absorção de energia no domínio elástico.
Rotura	Fractura.
sin	Seno.
Software	Programa informático.
Standard	Padrão.

Tenacidade Capacidade de absorção de energia.

Tensão de cedência Tensão que separa o domínio elástico do plástico.

Tensão de rotura Tensão na qual se inicia a estricção. Tensão máxima na curva de engenharia.

Volumetric Locking Bloqueio volumétrico.

Workbench Vertente gráfica do programa *ANSYS*.

ABREVIATURAS

AEFNOR *Association Française de Normalisation*. Associação Francesa de Normalização.

AENOR *Asociación Española de Normalización y Certificación*. Associação Espanhola de Normalização e Certificação

APDL *ANSYS Parametric Design Language*. Linguagem de Desenho Paramétrica do *ANSYS*.

ASTM *American Society for Testing and Materials*. Associação Americana para Teste e Materiais. Organização de normalização.

CAD *Computer Aided Design*. Desenho Assistido por computador.

CAE *Computer Aided Engineering*. Engenharia Assistida por Computador.

CEN *European Committee for Standartizadion*. Comité Europeu de Normalização

DIN *Deutsches Institut für Normung e. V.*. Norma de acordo com o Instituto Alemão de Padronização.

EN Norma Europeia.

FDM *Finite Differences Method*. Método das Diferenças Finitas.

FEA *Finite Element Analysis*. Análise de Elementos Finitos.

FEM *Finite Element Method*. Método de Elementos Finitos.

FVM *Finite Volume Method*. Método dos Volumes Finitos.

HGV Veículo pesado de mercadorias.

IPQ Instituto Português da Qualidade.

ISO *International Organization for Standardization*. Norma de acordo com a Organização Internacional de Padronização.

JAE Junta Autónoma das Estradas.

LIER *Laboratoire d'essais INRETS Equipements de la route*. Laboratório de teste de Equipamento Rodoviário do Instituto nacional (Francês) de pesquisa em transportes e sua segurança.

NCHRP *National Cooperative Highway Research Program*. Programa de Pesquisa e Cooperação Nacional de Auto-estradas (Estados Unidos da América).

NF Norma Francesa.

NP Norma Portuguesa.

SETRA *Service d'Etudes Techniques de Routes et Autoroutes*. Serviço de Estudos Técnicos de Estradas e Auto-estradas. Instituição francesa.

UNE Norma Espanhola.

UNC *Unified Coarse*. Rosca grosseira unificada nacional (Estados Unidos da América). Segundo a normalização UTS.

UTS *Unified Thread Standard*. Norma de roscas unificadas. Usada essencialmente nos Estados Unidos da América e Canadá.

1 INTRODUÇÃO

As barreiras de protecção de estradas, usualmente denominadas como *rails*, são elementos que visam aumentar a segurança das vias rodoviárias.

O objectivo das mesmas prende-se com garantir a segurança do automobilista e dos restantes utilizadores da via, em caso de despiste. O objectivo teórico das mesmas é garantir a imobilização ou redireccionamento do veículo em despiste sem que este transponha a barreira. Este acontecimento visa ser atingido através da transformação do movimento do veículo, energia cinética, em deformação da barreira de protecção.

Estas barreiras surgem no início da terceira década do século XIX, onde, segundo o registo de patentes *online*, *Espacenet* pertencente ao *European Patent Office*, a primeira remonta ao ano de 1922 (1).

Desde então que têm vindo a ser desenvolvidas, mas a maioria mantém o registo inicial ao nível do formato, com a haste, espaçador e viga longitudinal, e método de funcionamento. Quase um século depois verifica-se uma diversidade de elementos utilizados, não seguindo portanto um modelo único. Existem barreiras constituídas por cabos de aço, barreiras de betão, híbridas (betão e aço) entre outras.

Existe contudo legislação associada às barreiras de protecção de estradas, que determina materiais, tratamentos, distâncias e dimensões. Portanto, desde o fabrico à aplicação nas vias, existem normas a seguir, como por exemplo a europeia EN 1317 (sistemas de retenção rodoviária) (2).

Contudo verifica-se através de locais de acidentes que estas barreiras metálicas têm um comportamento distante do que se pretende, tanto por via da má fixação dos prumos como pela não rotura da ligação entre o prumo e o espaçador, sendo esse o motivo de estudo deste trabalho. Assim, este estudo incide essencialmente sobre a plasticidade, e comportamento das barreiras ao nível das ligações (ao solo e prumo-barra). Devido à maior dificuldade de análise do comportamento plástico dos materiais, este trabalho tem o apoio de *software* (programa informático), o *ANSYS*, de modo a poder reproduzir e analisar um exemplo numérico com o intuito de verificar onde se encontram os maiores problemas.

1.1 Definição do problema

A primeira barreira de protecção de estradas a ser patenteada, segundo a pesquisa efectuada, remonta a 27 de Março de 1923 (data de publicação) por John A. Lawson (Anexo A). Não possui exactamente os mesmos componentes de hoje em dia, mas assemelha-se, e tinha precisamente o mesmo objectivo.

Actualmente as barreiras de protecção rodoviárias apresentam-se em diferentes formas, desde cabos de aço a barreiras de betão. Contudo o tipo de barreiras mais frequente, e que será objecto de estudo neste trabalho são constituídas por três elementos principais (figura 1.1) e o material constituinte é o aço. Para além destes elementos existem ainda os parafusos de ligação entre os diversos elementos.

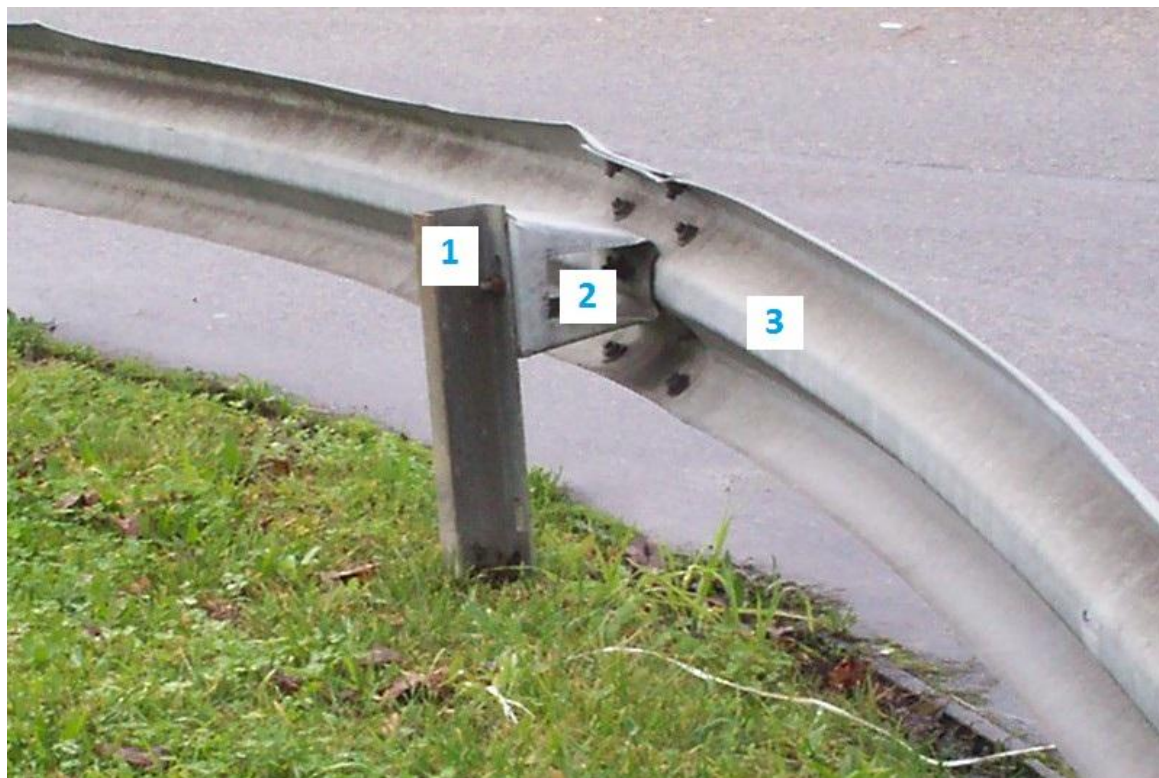



Figura 1.1 – Elementos constituintes de uma barreira de protecção rodoviária (3).

Os três elementos presentes na figura 1.1 são:

1. Prumo (polo vertical de fixação ao solo);
2. Espaçador;
3. Barra longitudinal.

No campo da resolução de problemas matemáticos existem vários métodos de discretização, sendo os mais conhecidos: o método dos elementos finitos (*F.E.M.*), o método das diferenças finitas (*F.D.M.*), método dos volumes finitos (*F.V.M.*) (4). Para este trabalho é utilizado o método de discretização dos elementos finitos.

O programa informático utilizado para tal denomina-se *ANSYS*. Neste são executadas apenas análises estáticas, embora o mesmo programa permita a execução de outro tipo de análises, incluindo as dinâmicas. Estas mesmas análises têm como objectivo obter resultados de plasticidade, com a introdução de um material próprio analisado durante este trabalho.

Existe ainda a questão da legislação, devendo ser seguidas todas as normas que definem o elemento em estudo, pelo que esta é abordada neste capítulo. De realçar a norma que verifica a capacidade de contenção das barreiras de protecção rodoviária, a norma EN 1317 (2).

Por fim, neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, referente à investigação efectuada em torno do tema deste trabalho.

1.2 Diversidade de estruturas metálicas

A pesquisa efectuada verifica existirem cinco tipos diferentes de barreiras (consoante a função) de protecção rodoviária, sendo elas:

1. Barreiras de protecção simples (apenas com uma barreira longitudinal) (figura 1.2);
2. Barreiras de protecção dupla (com duas barreiras longitudinais) (figura 1.3);
3. Barreiras obras de arte (aquando a existência de desníveis entre a via e o local de fixação, por exemplo passeios) (figura 1.4);
4. Barreiras de segurança a motociclistas (contem uma barreira metálica semi-flexível na zona inferior da protecção rodoviária, de modo a evitar o choque com os prumos) (figura 1.5);

5. Barreiras BHO (aquando a existência de passagens superiores ou qualquer tipo de barreira vertical, utilizam-se perfis UPN de modo a reforçar a estrutura) (figura 1.6).

Figura 1.2 – Barreiras de protecção simples (5).

Figura 1.3 – Barreiras de protecção dupla (5).

Figura 1.4 – Barreiras obras de arte (3).

Figura 1.5 – Barreiras de segurança a motociclistas (em baixo) (3).

Figura 1.6 – Barreiras BHO (5).

1.3 Elementos constituintes da barreira de protecção metálica

Dentro de cada elemento dos três referidos inicialmente (figura 1.1) existem diversos formatos. Os formatos apresentados em seguida são comercializados em Portugal (5).

1.3.1 Prumos

Os prumos comercializados têm três formatos diferentes (5). Dois realizam a ligação ao solo por meio de pressão e um por meio de fixação com aparafusagem, este último associado às barreiras de protecção obra de arte.

O prumo UPN120 (DIN 1026 (6)), presente em seguida na figura 1.7 semelhante ao apresentado na figura 1.1.

Figura 1.7 – Prumo UPN120 (5).

O prumo C125 (DIN 10162 (7)), presente na figura 1.8, com furação frontal ao contrário do apresentado na figura 1.7.

Figura 1.8 – Prumo C125 (5).

O prumo presente na figura 1.9 é o utilizado nas barreiras obra de arte. O perfil do prumo é como se pode verificar o mesmo que na figura 1.8, C125. Contudo a fixação ao solo é diferente do exemplo presente na figura 1.4 (apenas uma placa metálica com chumbadores roscados).

Figura 1.9 – Prumo utilizado nas barreiras obras de arte (5).

1.3.2 Espaçadores

Em termos de espaçadores, também se comercializa três diferentes tipos (5).

O primeiro apresentado é o espaçador tipo II (figura 1.10), para executar a ligação com elementos barra longitudinal em W, também observável na figura 1.1, entre outras.

Figura 1.10 – Espaçador tipo II (5).

O espaçador de calha U (figura 1.11), para fazer a ligação com o elemento barra de calha em U presente adiante na figura 1.15.

Figura 1.11 – Espaçador de calha U (5).

E ainda o espaçador de passagem de emergência (figura 1.12). Permite uma desmontagem rápida, representando uma solução para situações de emergência, por exemplo, sempre que haja necessidade de abrir uma passagem entre duas faixas de auto-estrada.

Figura 1.12 – Espaçador de passagem de emergência (5).

Existem mais um para o caso das barreiras com protecção para motociclistas como se pode ver na figura 1.13 e anteriormente na figura 1.5. Tem assim como função fixar a

barra longitudinal inferior, que evita, em caso de acidente o contacto de motociclistas com os prumos verticais.

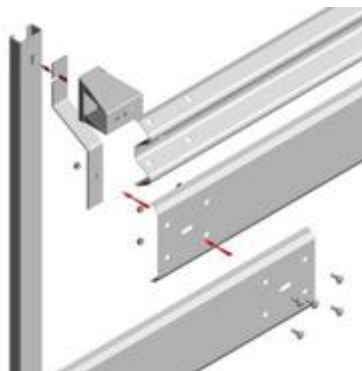



Figura 1.13 – Espaçador de barreiras de segurança de motociclistas (5).

1.3.3 Barras longitudinais

Quanto às barras longitudinais, comercializam-se também dois tipos diferentes (5).

As barras em W (figura 1.14), ou de dupla onda, das quais existem diversas dimensões normalizadas, conforme o distanciamento entre prumos (2 metros (daí o furo central na barra intermediária) ou 4 metros), também eles pré-definidos. São porventura o tipo de barras longitudinais mais utilizadas.

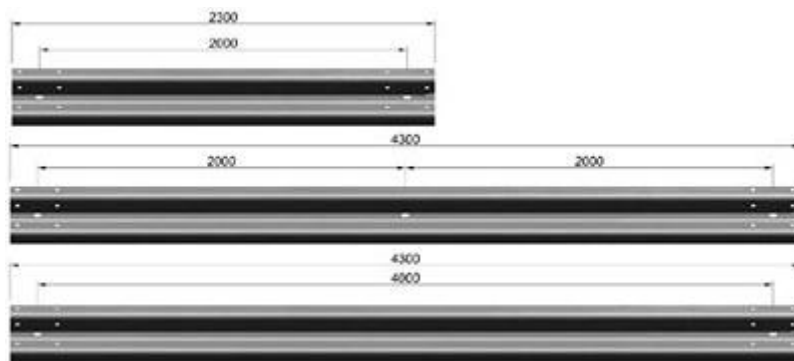



Figura 1.14 – Barras em W (5).

As barras de calha em U (figura 1.15), utilizadas por exemplo, em barreiras rodoviárias obra de arte (figura 1.4).

Figura 1.15 – Barras de calha em U (5).

1.3.4 Extremidades

Existem ainda as extremidades (da figura 1.16) com diversas formas consoante os restantes acessórios e localização.

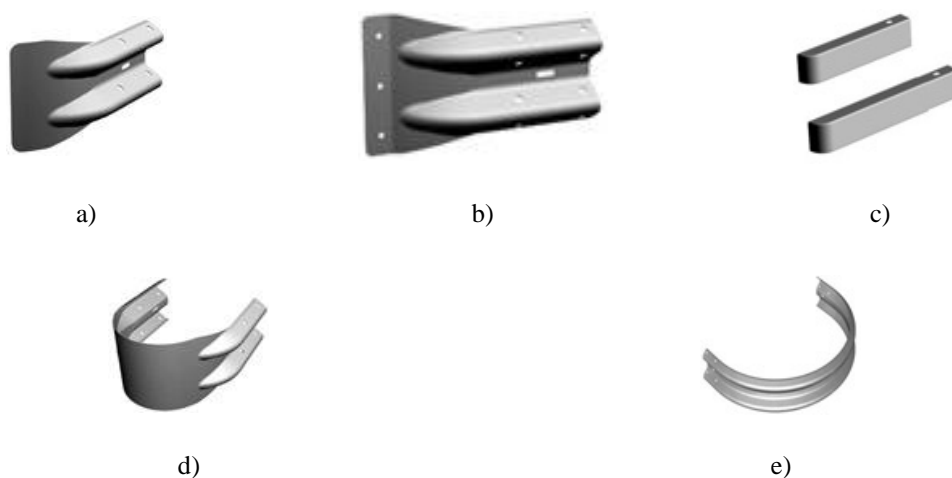



Figura 1.16 – Diversas extremidades (5). a) Extremidade do tipo Cauda de Carpa. b) Extremidade em espátula de amarração ao New Jersey (figura 1.19). c) Extremidade em Calha U. d) Extremidade dupla tipo dupla Cauda de Carpa. e) Extremidade em barreira calandrada.

1.4 Estruturas alternativas

Em seguida estão presentes alguns dos outros tipos de barreiras mencionados anteriormente.

Barreiras tubulares (figura 1.17), situadas na cidade de Guimarães. A área circundante à imagem possui barreiras semelhantes à da figura 1.1.

Figura 1.17 – Barreiras longitudinais tubulares (3).

Barreiras com cabo de aço a desempenhar o papel de barra longitudinal, sem utilização de espaçador (figura 1.18).

Figura 1.18 – Barreiras de cabo longitudinal (3).

Existem também as barreiras de betão, denominadas barreiras *New Jersey* (figura 1.19). São utilizadas em zonas de obras, mas não só, também têm aplicação definitiva, tanto como função de barreira como de separador central.

Figura 1.19 – Barreiras *New Jersey* (8).

Barreiras de betão híbridas, construídas por betão, e aço no seu interior (9), são bastante eficientes segundo a notícia presente no Anexo B. Exteriormente assemelham-se com as *New Jersey*.

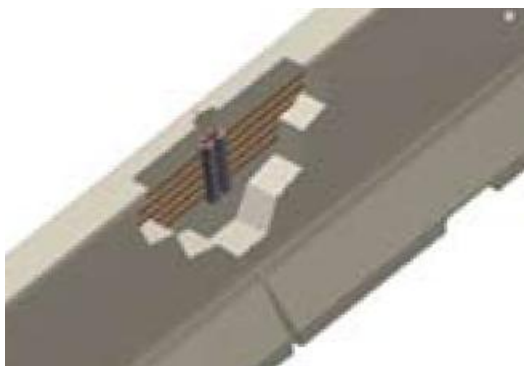



Figura 1.20 – Barreiras de betão híbridas, betão e aço (9).

1.5 Análise de elementos finitos

O desenvolvimento do método dos elementos finitos (F.E.M.) data do final da década de 50, ligado aos trabalhos de Turner, Argyris, Kelsey e Clough, o qual introduziu primeira vez o termo "elemento finito" (10). As primeiras aplicações do método dos elementos finitos foram efectuadas na resolução de problemas de análise estrutural, tendo as aplicações no domínio das tecnologias de fabrico sido apenas iniciadas nos anos 60 (10). Marçal, Yamada, Zienkiewicz, Kobayashi e respectivos colaboradores foram os primeiros investigadores a aplicarem o método dos elementos finitos na resolução de problemas elasto-plásticos em deformação plana ou axissimétrica (10).

A vantagem do método dos elementos finitos assenta na versatilidade e generalidade possibilitando estudo de quaisquer peças independentemente na forma geométrica das matrizes e das condições de atrito existentes entre estas e o material em deformação (10). Por outro lado o método dos elementos finitos permite obter as distribuições das principais variáveis de campo no interior das peças e nas interfaces destas com as ferramentas, conduzindo a um dimensionamento correcto das peças e das ferramentas (10).

Os elementos finitos permitem a resolução de diferentes modelos matemáticos, como por exemplo se encontra ilustrado na figura 1.21 (4).

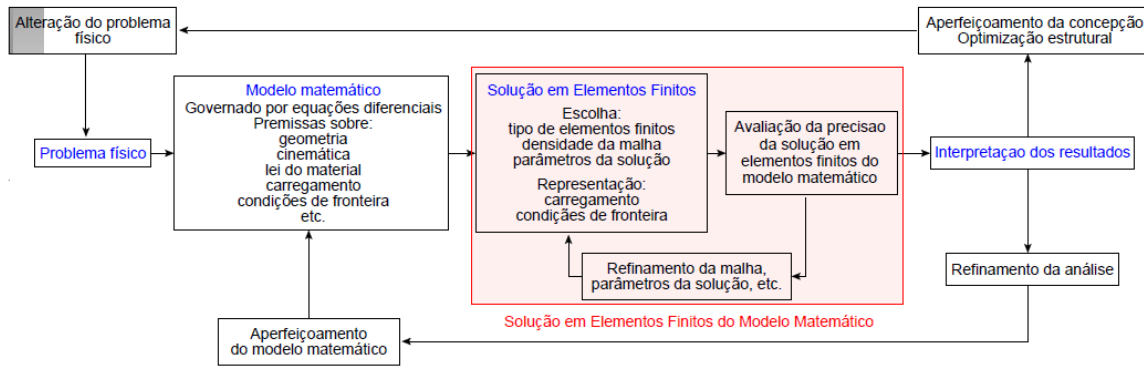



Figura 1.21 – Ciclo de análise de um modelo matemático (4).

A análise de elementos finitos (F.E.A.) representa o estudo numérico efectuado a partir do método dos elementos finitos, que por sua vez é obtido através resolução de sistemas de equações diferenciais parciais. São disso exemplo as equações de equilíbrio de tensões, que na ausência de forças mássicas distribuídas pelo volume do corpo são representadas pelas equações (1.1) (10).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial Y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial Z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial Z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial Y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial Z} = 0 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Ou sob a forma abreviada (equação (1.2)) (10).

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_j} = 0 \tag{1.2}$$

A formulação do método dos elementos finitos varia consoante o problema em análise, contudo esta pode ser baseada no método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio, ou em métodos híbridos e mistos (11). Ao método dos deslocamentos estão associados conceitos como graus de liberdade, matriz de rigidez da estrutura, força, condições de apoio, entre outros (11).

Essa mesma análise pode ser efectuada segundo diversos parâmetros, como a análise estática ou dinâmica de uma estrutura, obtendo uma solução implícita ou explícita respectivamente (figura 1.22).

Solução	Velocidade de Impacto (m/s)	Taxa de Deformação (/s)	Efeito
Implícita		$<10^{-5}$	**Estático**
	< 50	$10^{-5} - 10^{-1}$	**Elástico**
	50 -1000	$10^{-1} - 10^{1}$	**Elasto-Plástico (resistência do material significativa)**
	1000 - 3000	$10^{5} - 10^{6}$	**Essencialmente plástico (pressão iguala ou excede a resistência do material)**
	3000 - 12000	$10^{6} - 10^{8}$	**Hidrodinâmico (pressão muitas vezes superior à resistência do material)**
Explícita	> 12000	$> 10^{8}$	**Vaporização dos sólidos em colisão**

Figura 1.22 – Tipo de solução obtida perante a velocidade de impacto (12).

A modelação de uma estrutura pode ser executada num programa de engenharia assistida por computador (*C.A.E.*) que possua a capacidade de modelação, ou num programa de desenho assistido por computador (*C.A.D.*), transferindo posteriormente o modelo para um programa CAE para que possa ser efectuada a análise.

Após a modelação é executada a criação da malha para esse mesmo modelo/estrutura. Esta malha é então constituída por vários elementos.

Com a análise do comportamento da estrutura através do conjunto de elementos finitos ligados entre si (a malha) obtém-se a solução numérica obtida por análise de elementos finitos.

O programa informático utilizado neste trabalho denomina-se *ANSYS*. A empresa, de igual nome, foi fundada em 1970 e possui um conjunto de trabalho possuindo nível de Mestre ou Doutor, maior que qualquer outro fornecedor de programas de simulação (13). Um dos motivos que leva à tomada de opção por este programa de simulação prende-se com o facto de possuir capacidade de solução de problemas que envolvam deformação plástica, algo que não está presente em todos os restantes programas de engenharia (CAE).

Os elementos constituintes do modelo variam consoante o tipo de estrutura ou por opção do operador. Estruturas tipo casca utilizam elementos "*Shell*" (Cascas) enquanto estruturas sólidas utilizam frequentemente elementos "*Solid*" (Sólidos), entre muitos outros consoante também o tipo de análise a executar, "*Fluid*" (Fluídos), "*Thermal*" (Térmicos), entre muitos outros. Dentro do tipo de elementos existem ainda variações destes, conforme a forma do elemento que se pretende, hexaedros, tetraedros entre outras formas prismática (ver figura 1.23). Ainda dentro destes existem derivações de elementos, consoante o número de nós que se pretende para o elemento. Por fim, existe ainda a opção pontos de integração a considerar na execução da análise, ou seja, um elemento previamente definido pode ter a opção (pois não está disponível em todos, está de acordo com as KEYOPT abordadas adiante neste trabalho) de considerar uma integração total, ou reduzida, que aumenta ou diminui respectivamente, para cada elemento, o pormenor da análise.

Quanto maior for o número de nós e de pontos de integração, maior é a capacidade do elemento atingir uma deformação próxima da real, contudo, essa mesma capacidade nem sempre se traduz em resultados mais precisos ou correctos (14). Em igual situação se encontra a definição da malha, que pode ir desde "grosseira" a "fina". Uma malha mais refinada, mais "fina" portanto, nem sempre se traduz em resultados mais precisos (15).

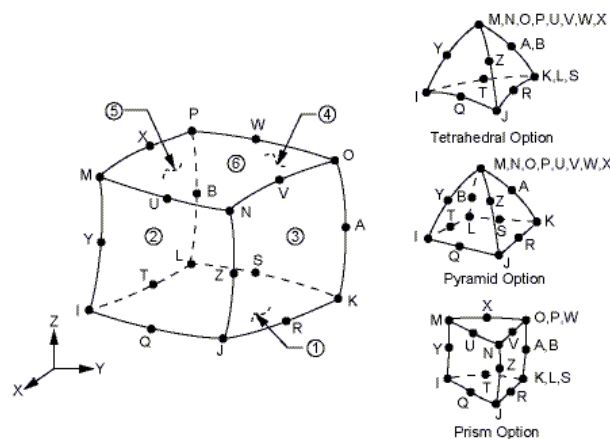



Figura 1.23 – Elemento SOLID186, e outras formas prismáticas (à direita) (16).

A utilização da simulação numérica tem como objectivo obter melhores soluções para qualquer problema diminuindo custos relativos a ensaios experimentais preliminares. A sua utilização não elimina a possibilidade de execução de ensaios práticos, contudo permite a redução dos mesmos (figura 1.21).

Opta-se neste trabalho pelo recurso ao método dos elementos finitos porque se pretende obter uma lei de comportamento mecânico das ligações estruturais provocado pela utilização de diversas componentes do sistema de barreiras de protecção rodoviária. Completar este trabalho com uma análise experimental aos mesmos componentes seria igualmente muito válida, mas será alvo de trabalhos futuros.

1.6 Legislação

Na área de estudo do presente trabalho existem legislação e normas diversas que têm de ser seguidas, desde as que definem o material as características do material utilizado (EN 10025 (17), EN 10027 (18) e NP 1729 (19)), passando pela galvanização (no caso de imersão a quente, EN 1461 (20)), os parafusos utilizados nas ligações (medidas e galvanização de acordo com a EN 20898 (21) e EN 3740 (22) respectivamente), dimensões dos perfis dos prumos (DIN 1026 (6), DIN 10162 (7), UNE 135122 (23), NF P 98412 (24), (25) e EN 10279 (26)), e da barra longitudinal (UNE 135121 (27) e NF P 98411 (24), (25)), o funcionamento do sistema de contenção das protecções rodoviárias (EN 1317 (2)), até acabar nos locais de colocação das barreiras rodoviárias (JAE P3/94 (28)).

As siglas EN representam norma europeia (provenientes do CEN, Comité Europeu de Normalização). As siglas UNE representam norma espanhola (provenientes da AENOR, Associação Espanhola de Normalização e Certificação). As siglas NF, representam a norma francesa (provenientes da AFNOR, Associação Francesa de Normalização). Por fim as siglas NP, representam a norma portuguesa (provenientes do IPQ, Instituto Português da Qualidade). Isto porque alguns dos perfis utilizados em Portugal (pelo menos os disponibilizados em (5)), mencionados anteriormente, utilizam a norma espanhola e francesa, como é possível verificar na tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Materiais, características e normas diversas utilizadas em diversos países (29).

<table>
<tr><th colspan="4">Especificações técnicas utilizadas na barra longitudinal em forma W</th></tr>
<tr><td>País</td><td>Espanha</td><td>França</td><td>Estados Unidos</td></tr>
<tr><td>Perfil (norma)</td><td>UNE 135121</td><td>NF P 98411</td><td>AASHTO M180</td></tr>
<tr><td>L (mm)</td><td>4318</td><td>4315</td><td>4128/7938</td></tr>
<tr><td>L1 (mm)</td><td>4000</td><td>4000</td><td>3810/7620</td></tr>
<tr><td>L2 (mm)</td><td>2000</td><td>2000</td><td>1905/3810</td></tr>
<tr><td>Aço</td><td>AP11</td><td>S235JR</td><td></td></tr>
<tr><td>Aço (norma)</td><td>UNE 36093</td><td>NF EN 10025</td><td>AASHTO M180</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Galvanização (norma)</td><td rowspan="2">UNE 37508</td><td rowspan="2">NF A 91121</td><td>ASSHTO M232</td></tr>
<tr><td>AASHTO T 65</td></tr>
<tr><th colspan="4">Especificações técnicas do prumo</th></tr>
<tr><td>País</td><td colspan="2">Espanha</td><td>França</td></tr>
<tr><td>Perfil (norma)</td><td colspan="2">UNE 135122</td><td>NF P 98412</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Perfil</td><td rowspan="2">C100</td><td rowspan="4">UPN120</td><td>C100</td></tr>
<tr><td>C125</td></tr>
<tr><td rowspan="2">C120</td><td>UPN100</td></tr>
<tr><td>IPE80</td></tr>
<tr><td rowspan="2">L (mm)</td><td colspan="2">1150</td><td>1500</td></tr>
<tr><td colspan="2">2000</td><td>2000</td></tr>
<tr><td>Aço</td><td>AP-11</td><td>S275JR</td><td>S235JR</td></tr>
<tr><td>Aço (norma)</td><td>UNE 36093</td><td>UNE EN 10025</td><td>NF EN 10025</td></tr>
<tr><td>Galvanização (norma)</td><td colspan="2">UNE 37508</td><td>NF A 91121</td></tr>
</table>

O material supostamente e usualmente utilizado no fabrico destas protecções são os aços S235JR ou S275JR, com um tratamento anti-corrosivo obtido por galvanização a quente, de acordo com a norma EN ISO 1461 (30), (24). Nos aços anteriormente mencionados, a sigla “S” representa a aplicação do aço em causa, neste caso refere um aço estrutural. O valor numérico em seguida representa a tensão de cedência do material em megapascal (MPa). Por fim, “JR” significa uma resistência de pelo menos 27 Joule (J) a uma temperatura de 20º Celsius (C).

Na tabela 1.2 é possível verificar que estes aços correspondem em Portugal ao material Fe 360-B e Fe 430-B respectivamente.

Tabela 1.2 – Identificação do material segundo a norma EN 10025 (31).

Designação de acordo com a norma EN 10025-2:2004	Designação equivalente em :
	Portugal - de acordo com a norma NP 1729
S235JR	Fe 360-B
S275JR	Fe 430-B

De seguida na tabela 1.3 é possível verificar segundo a norma, a tensão de cedência e de rotura dos aços S235JR e S275JR consoante a espessura da estrutura constituinte.

Tabela 1.3 – Propriedades (tensão de cedência e de rotura) do material segundo a norma EN 10025 (31).

Designação de acordo com a norma EN 10027-1	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão de Rotura (MPa)	
	Espessura (mm)	Espessura (mm)	
	x ≤ 16	x ≤ 3	3 ≤ x ≤ 100
S235JR	235	360 a 510	360 a 510
S275JR	275	430 a 580	430 a 560

Por fim, ainda dentro das propriedades do material é possível verificar os resultados dos ensaios de tracção, utilizados na elaboração desta norma, consoante a espessura do provete, em termos de percentagem de deformação final, para os materiais anteriormente descritos (tabela 1.4).

Tabela 1.4 – Características do ensaio de tracção do material segundo a norma EN 10025 (31).

Designação de acordo com a norma EN 10027-1	Extensão após fractura (%)	
	l_0 = 80 mm	$l_0 = 5{,}65^*\sqrt{A_0}$
	Espessura (mm)	Espessura (mm)
	$2{,}5 \leq x \leq 3$	$3 \leq x \leq 40$
S235JR	21	26
S275JR	19	23

Os parafusos de ligação entre os elementos devem por sua vez estar de acordo com as normas EN 20898 (21) e EN 3740 (22) em termos de dimensões, material e galvanização (30).

A escolha do tipo de barreira e seus constituintes varia entre países, respeitando sempre a norma. Dentro de cada país, nomeadamente Portugal, existem empresas que executam a instalação das estruturas, e cada uma utiliza os formatos que pretende, desde que respeitem as normas existentes. Por exemplo, ao escolher o material S235JR, este tem de estar de acordo com a respectiva norma EN 10025 (17) (aço estruturais conformados a quente), se escolher as barras longitudinais em W, estas têm de estar de acordo com a respectiva norma (NF P 98411 (24), (25) para dimensões, EN 10025 (17) para o aço, NF A 91121 (24) para a galvanização). Por fim são executados testes (abordados adiante na tabela 1.5) a essas mesmas barreiras de acordo com a norma EN 1317 (sistemas de retenção rodoviária), se respeitarem a mesma, poderão ser aplicadas nas vias rodoviárias.

A pesquisa efectuada verifica que qualquer barreira de segurança rodoviária tem de estar homologada de acordo a norma portuguesa NP EN 1317 (32) (partes 1 a 6) ou europeia EN 1317 (2) (partes 1 a 6).

Para tal são efectuados testes com diferentes parâmetros presentes na tabela 1.5. A norma de onde foram retirados estes parâmetros, EN 1317-2:1998 (33), foi revista apenas recentemente, mais propriamente em 2010. A sigla *HGV* representa, veículo pesado de mercadorias.

Tabela 1.5 – Parâmetros de embate de veículos presentes na norma EN 1317-2 (33)

Teste	**Velocidade de impacto** km/h	**Ângulo de impacto** graus	**Massa total do veículo** kg	**Tipo de veículo**
TB 11	100	20	900	Automóvel
TB 21	80	8	1 300	Automóvel
TB 22	80	15	1 300	Automóvel
TB 31	80	20	1 500	Automóvel
TB 32	110	20	1 500	Automóvel
TB 41	70	8	10 000	Pesado de mercadorias rígido
TB 42	70	15	10 000	Pesado de mercadorias rígido
TB 51	70	20	13 000	Autocarro
TB 61	80	20	16 000	Pesado de mercadorias rígido
TB 71	65	20	30 000	Pesado de mercadorias rígido
TB 81	65	20	38 000	Pesado de mercadorias articulado

Os parâmetros utilizados na tabela 1.5 são posteriormente analisados e enquadrados relativamente à capacidade de contenção da barreira, como é possível verificar na tabela 1.6. Nesta a capacidade de contenção aumenta de T1 (baixa contenção) até H4b (elevadíssima contenção). O parâmetro TB 21, referente ao veículo mais leve, de 900 kg de massa, pretende verificar que as barreiras de elevada contenção para veículos pesados, são também elas seguras para veículos leves.

Tabela 1.6 – Capacidade de contenção das barreiras perante os testes efectuados, presentes na norma EN 1317-2 (33).

Níveis de contenção	**Testes de aceitação**
Contenção a baixo ângulo	
T1	TB 21
T2	TB 22
T3	TB 41 e TB 21
Contenção normal	
N1	TB 31
N2	TB 32 e TB11
Contenção elevada	
H1	TB 42 e TB 11
H2	TB 51 e TB 11
H3	TB 61 e TB 11
Contenção muito elevada	
H4a	TB 71 e TB11
H4b	TB 81 e TB 11

Em Portugal, existem empresas de instalação de elementos de segurança rodoviária, como é o caso da Metalocar, mencionada anteriormente, a Metalocardoso, a Viapor, entre outras. Estas encontram-se de acordo com a EN 1317 (2). A referência (34) apresenta informação quanto à certificação da Metalocar, e o Anexo C apresenta o certificado disponibilizado pela Metalocardoso segundo o cumprimento do parâmetro TB32. Todos estes testes são executados no *LIER* (*Laboratoire d'essais INRETS Equipements de la Route*).

Entre outros pontos existem determinadas medidas estipuladas, como distância entre prumos (2 ou 4 metros), distância da barreira ao solo e medida do prumo (figura 1.24), a sobreposição das barras por sua vez, terá de ter um comprimento equivalente a 300, 315 ou 318 mm, de acordo com o fabricante, e a barreira que sobrepõe à outra tem de estar no sentido de movimento do trânsito para que em caso de embate esta não trepasse a carroçaria do automóvel, são alguns pormenores importantes a ter em consideração. A barreira nunca se pode iniciar acima do nível do solo considerando o sentido do movimento do trânsito. Todas as extremidades livres devem ser firmemente ligadas ao solo (ancoradas).

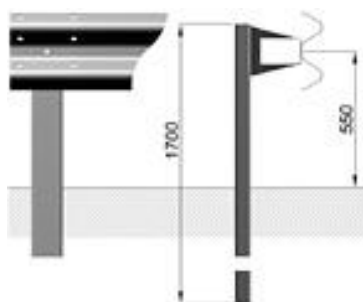



Figura 1.24 – Distância da barreira ao solo utilizada pela Metalocar (5).

Os locais de instalação das barreiras de protecção rodoviária, encontram-se estipulados de acordo com a norma de traçado (JAE P3/94 (28)), e de acordo com a Lei n.º 33/2004, de 28 de Julho, sendo que esta última torna obrigatória a colocação de protecções inferiores (de modo a que não fique exposto o prumo, muito importante para os motociclistas) nos pontos de maior risco das vias rodoviárias.

Em França existe uma ampla investigação e desenvolvimento de segurança das vias rodoviárias, tendo instituições como o *SETRA* (*Service d'Etudes Techniques de Routes et Autoroutes*) e o *LIER* (*Laboratoire d'essais INRETS Equipements de la Route*). Neste

último são realizados testes onde as 4 variáveis/factores fundamentais são a velocidade, ângulo de embate, massa do veículo e tipo de veículo.

Por fim, ainda no capítulo da legislação, de acordo com a norma EN 10002 (35) (Materiais metálicos – Ensaio de tracção), os provetes que fazem parte deste estudo e que serão abordados *a posteriori*, devem ser dimensionados e verificados os resultados de acordo com um l_0=80mm. Embora a norma apresente uma fórmula de cálculo para o cálculo do l_0, esta admite a execução de provetes com medidas "não proporcionais", ou seja, não de acordo com fórmulas de cálculo, mas sim medidas *standard* para um material específico. Para os aços S235JR e S275JR o l_0 *standard* é de 80 mm.

Tabela 1.7 – Dimensões de provetes *standards* na tabela D.2 da norma EN 10002 (36).

Provetes planos com espessura igual ou superior a 3 mm

D.2.3.2 Provetes não proporcionais

Provetes não proporcionais podem ser utilizados, se especificados como standard para o producto.

Tabela D.2 - Dimensões típicas do provete

Largura b mm	Comprimento inicial l_0 mm	Comprimento mínimo de igual largura l_c mm	Comprimento total l_t mm
40	200	225	450
25	200	225	450
20	80	90	300

1.7 Revisão bibliográfica

Para a execução deste trabalho é efectuada uma revisão bibliográfica de trabalhos efectuados por terceiros na área de estudo do presente trabalho. Mesmo que não específicos da área de estudo a que se prende este trabalho, as ligações das barreiras de protecção rodoviárias, segundo uma análise estática, é sempre importante mencionar a sua análise, até porque existem alguns que apresentam descrição de comportamento importantes ou aplicáveis à presente área de estudo.

A pesquisa obtém resultados diversos, uns específicos relativos às barreiras de protecção rodoviária, outros mais generalizados, mas com alguma informação importante.

Klas Erik Engstrand (37) trata de uma análise dinâmica, não estática, tendo informação importante a retirar deste trabalho. O estudo refere-se às barreiras nos Estados Unidos da América, pelo que a legislação e normas seguidas vão de encontro às utilizadas no país. Este estudo compara uma análise experimental, realizada no Instituto de Transporte do Texas, com uma numérica, de sua autoria, recorrendo ao programa *LS-DYNA*, relativa ao comportamento dinâmico das barreiras. Tem como objectivo segundo o autor, analisar e melhorar o comportamento das barreiras tendo em conta a sua fraca prestação na contenção de veículos.

Neste estudo é possível verificar que o sistema de protecção rodoviário em causa não utiliza a componente de espaçador, pelo que o prumo se encontra directamente ligado à barra longitudinal. Os ensaios são executados segundo parâmetros existentes naquele país em semelhança aos presentes na Europa, representados na tabela 1.5. Verifica-se que ensaios com um veículo de 2000 kg de massa a uma velocidade de 100 km/h a um ângulo de 25 graus (parâmetro denominado de *NCHRP Report 350 test designation 3-11*, à semelhança dos presentes na tabela 1.5 para a Europa) resultam numa rotura da barra longitudinal com origem num dos furos de apertos dos parafusos que ligam as diversas barras. Tal situação leva o autor a fazer um ensaio de tracção a duas barras ligadas por intermédio de parafusos. O ensaio verificou que não houve fractura dos parafusos mas sim o corte do material e desencaixe dos parafusos por via da deformação do furo de aperto (figura 1.25), isto para uma força exercida superior a 400 kN.

Figura 1.25 – Rotura da ligação entre barras por via de um ensaio de tracção (37).

Este estudo verifica a introdução de concentração de tensões nos topos transversais da barra longitudinal por via do contacto directo com o prumo tendo em conta a deformação de todo o sistema de retenção. O estudo também efectua testes aos parafusos. Para parafusos de diâmetro 7,94 mm (A307A) no caso de ensaios experimentais com o parâmetro *NCHRP Report 350 test designation 3-11*, com duas placas com 2,64 mm de espessura entre a cabeça do parafuso e a barra longitudinal (figura 1.26 a), verifica-se que apenas uma camada de barra longitudinal (figura 1.26 b), e uma fêmea roscada, leva ao arranque da rosca do parafuso.

a) b)

Figura 1.26 – (37) a) Parafuso com duas placas sobre a barra. b) Uma camada de barra no aperto ao prumo.

Por sua vez, o mesmo teste mas com um parafuso de diâmetro 6,35 mm (A307A) para as mesmas condições com a adição de uma fêmea roscada (para evitar o arranque da rosca do parafuso) e uma anilha entre a fêmea roscada e o prumo, leva à fractura do parafuso. De salientar que na europa utilizam-se parafusos M16 na ligação entre barras e entre a barra e o espaçador. Segundo o autor, nos Estados Unidos também se utilizam parafusos de diâmetro 16 mm para as ligações entre barras, mas de 8 mm para a ligação entre barra e o prumo de modo a que este parta e permita que a barra se liberte do prumo de modo a que a absorção de energia funcione como pretendido.

Ainda no mesmo estudo são executados ensaios de tracção à ligação prumo-barra verificaram que consoante o ângulo de aplicação de força na barra longitudinal (entre 0 e 30 graus) levavam à rotura da ligação para forças entre 17,7 e 27 kN.

Para além de vários tipos de comportamento que levam à rotura das ligações, é possível verificar neste trabalho, que de facto é possível acontecer a rotura completa da barra longitudinal para impactos elevados (velocidade, ângulo e massa elevados), desde que a barreira em si acompanhe o automóvel, ou seja que este não a sobreponha no primeiro contacto. Para que tal aconteça a quebra do parafuso de 8 mm de diâmetro que liga o prumo à barra, funcionando como fusível é importantíssimo.

No artigo "*Dynamic response of connections in road safety barriers*" de Bayton, Long e Fourlais, referente a 2008 (38), é efectuado um estudo sobre o comportamento dinâmico (com taxas de deformação comparáveis às observadas em testes de colisão) das ligações das barreiras de protecção rodoviária. Visto que as ligações entre o espaçador e a barra longitudinal se dão por meio de furos com folga, para se poderem aparafusar duas barras sobrepostas. O sistema quando sujeito ao choque sofre um deslizamento até que o parafuso contacte com a extremidade do furo presente na barra. Este estudo executa modelos de elementos finitos não lineares dos provetes de teste construídos para os ensaios laboratoriais. Quando comparados os resultados laboratoriais verifica-se que os valores de rigidez inicial, força máxima e deslocamentos das ligações aparafusadas apresentavam valores semelhantes aos previstos pelo modelo de elementos finitos. Os testes efectuados apresentam apenas um plano de corte, tal como acontece nas ligações entre as barreiras de protecção rodoviária.

São executados testes de tracção para quatro tipos de ligações com dois parâmetros diferentes (com e sem deslizamento) e para cada, foram executados três provetes. O autor afirma também que embora seja necessária a folga nos furos de montagem dos parafusos das barreiras, esta provoca escorregamento que afecta a transferência de carga entre as barras longitudinais com vista à contenção do veículo. Contudo os ensaios laboratoriais efectuados não verificam grande diferença entre forças de ligação. Para uma ligação de quatro parafusos onde existe a maior diferença entre a média dos três provetes com e sem deslizamento verificou-se uma diferença de aproximadamente 14 kN, entre 237,67 kN para a ligação sem deslizamento e 223,57 kN para a ligação com deslizamentos. Nos três restantes tipos de ligação a diferença é inferior a 2 kN. O deslocamento da ligação, por sua vez, é realmente maior nos ensaios com deslizamento, devido ao deslizamento provocado pela folga nos furos para a montagem dos parafusos.

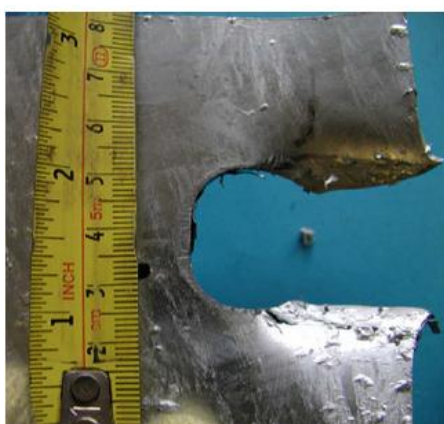
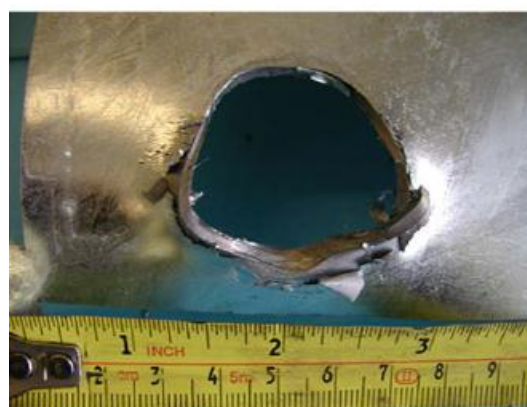
O mais importante a realçar deste trabalho é que a perda da ligação entre o parafuso e a barra pode acontecer tanto por corte do metal da barra como por desencaixe do parafuso do furo onde este é inserido, após o início da deformação plástica do furo (figura 1.27).

a) b)

Figura 1.27 – (38) a) Rotura do material. b) Desencaixe do parafuso.

Outro trabalho analisado é o "*Analysis of a safety barrier connection joint post-testing*" por Bayton, Jones e Fourlaris de 2007 (39).

Neste artigo é executado um estudo para examinar o efeito do impacto de um veículo nas ligações barra a barra (longitudinal) tanto no material da barra como no parafuso. São feitos ensaios baseados na norma EN 1317 (2) para o parâmetro TB32 (tabela 1.5) e para

o material aço S275 de acordo com norma EN 10025 (17). Verifica-se a deformação da área circundante ao furo, para além da compressão gerada pelo aperto inicial. O parafuso sofre apenas um pequena deformação da rosca com remoção de um pouco da sua galvanização. Dá-se também a deposição de galvanização pertencente à barra longitudinal, na rosca do parafuso. Contudo não se verificam deformações significativas no corpo do parafuso.

Outro autor (Blake (40)) a afirma que por razões práticas é preferível o corte do material que o desencaixe do parafuso aquando da rotura do sistema. O autor afirma também que este tipo de ligações é propício à existência de deslizamentos e que os efeitos desse deslizamento no parafuso podem levar à rotura prematura do sistema. Conclui-se assim deste trabalho que a ligação cede por rotura da barra, por corte do material ou desencaixe, e não por colapso do parafuso.

Reid e Hieser (41) apresentam um trabalho que tem como objectivo o estudo do comportamento de deslizamento de ligações aparafusadas, tendo em conta o aperto inicial. Não trata especificamente ligações de barreiras de protecção rodoviária. Neste artigo são executados testes em ligações com apenas um plano de corte e em que o parafuso pode romper a ligação sem que para isso tenha de romper material. O furo de aperto é aberto num dos elementos para que o parafuso possa romper por esse canal. Basicamente o que mantém a ligação é apenas a força de aperto inicial. São executados ensaios quase-estáticos e ensaios dinâmicos para uma ligação constituída por um parafuso *½-13UNC* com aperto inicial introduzido por um momento de aperto de 35 N.m. Os resultados estão presentes nos gráficos da figura 1.28 para os ensaios quase-estáticos e figura 1.29 para os ensaios dinâmicos.

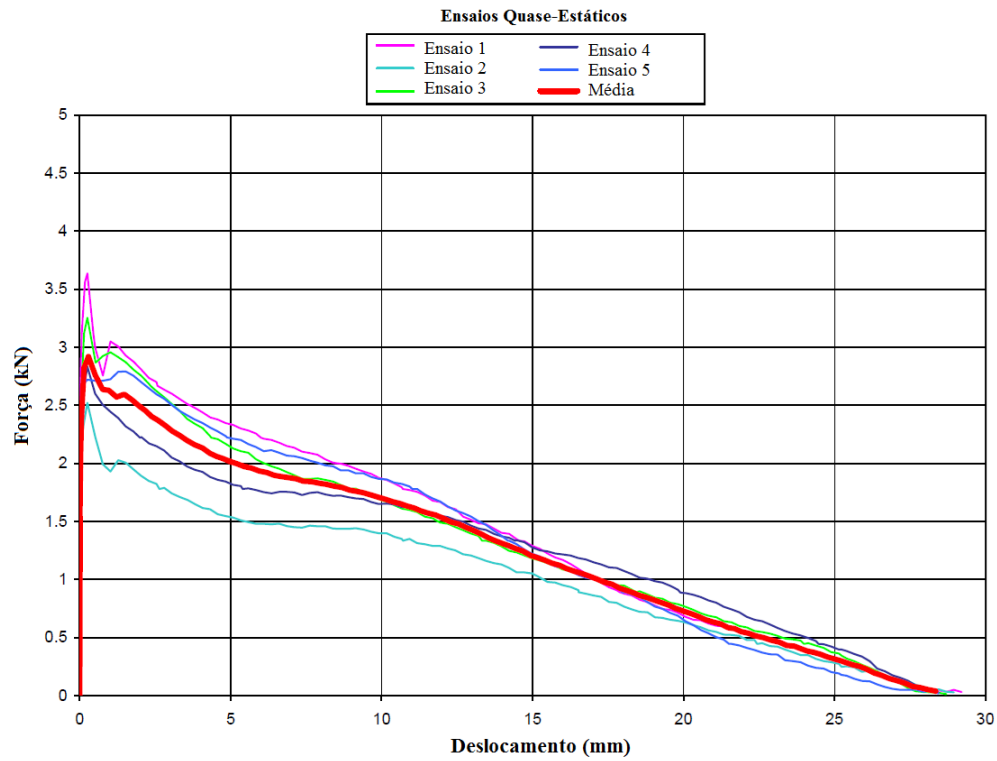



Figura 1.28 – Gráfico do ensaio quase-estático (41).

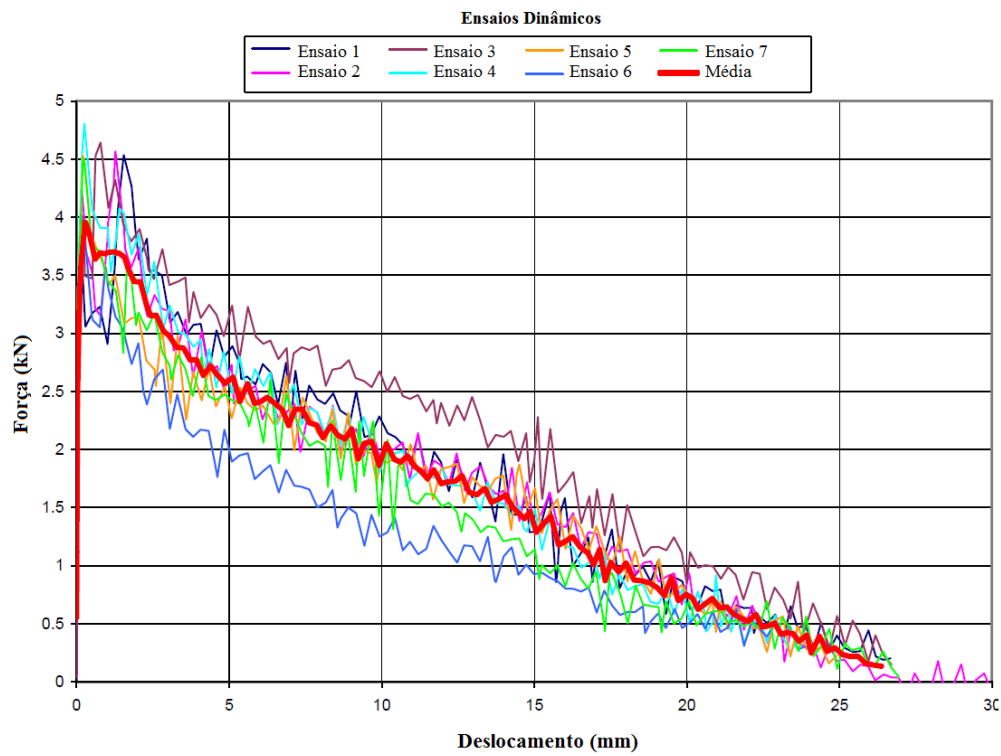



Figura 1.29 – Gráfico do ensaio dinâmico (41).

Este ensaio tem como objectivo perceber a capacidade que o aperto inicial tem para evitar o deslizamento. Neste caso são exercidas forças máximas na ordem dos 3 kN no caso dos ensaios quase-estáticos e 4 kN no caso dos ensaios dinâmicos.

Hui, Ruan e Yu (42), apresentam outro trabalho onde são executadas comparações entre testes estáticos e dinâmicos, exercidos sobre uma barra longitudinal em W, construída à escala de 1:3,75. Também é feita a análise de dissipação de energia nos postes, mas no ensaio dinâmico. Os ensaios são feitos com diferentes tipos de suporte e condições de fronteira. São considerados neste trabalho ensaios sobre superfícies de apoio rectangular (no caso da análise dinâmica um dos lados está fixo). É utilizada uma cunha que exerce a deformação colide ao centro da barra longitudinal (L/2). A massa da cunha é de 12,92 kg.

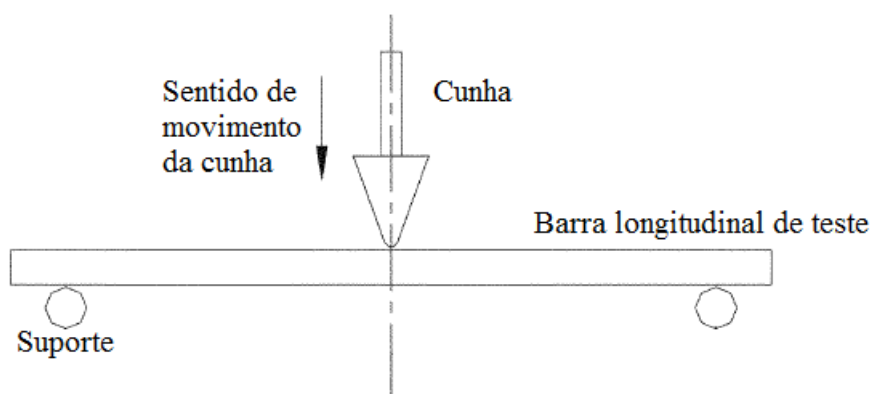



Figura 1.30 – Descrição do ensaio (42).

O ensaio quase-estático é executado com uma velocidade de deslocamento da cunha de 5 mm/min e retirada a carga ao fim de cada 10 mm de avanço, até atingir um deslocamento final de 120 mm. Os gráficos de forças resultantes estão presentes na figura 1.31 para o ensaio quase-estático e na figura 1.32 para o ensaio dinâmico.

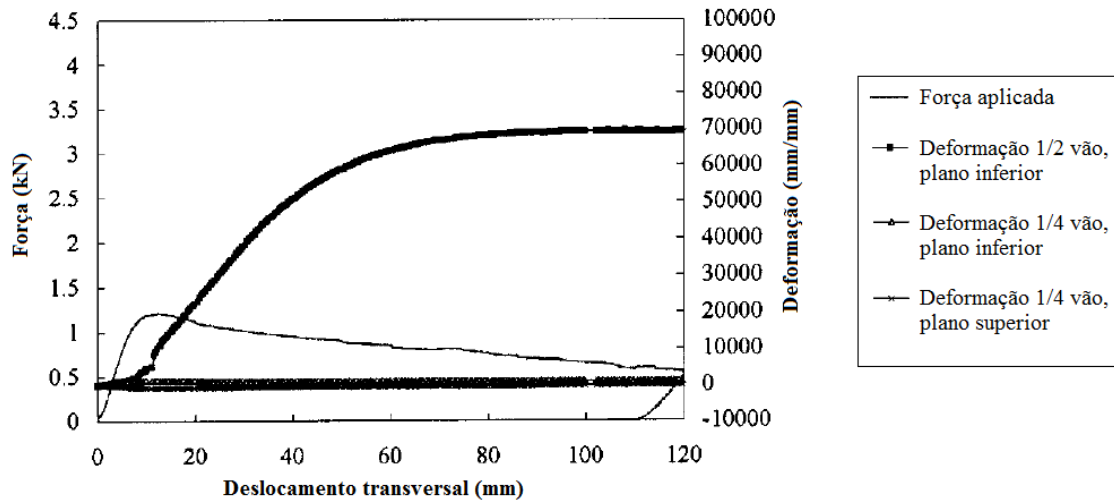



Figura 1.31 – Gráfico de deslocamentos do ensaio quase-estático (42).

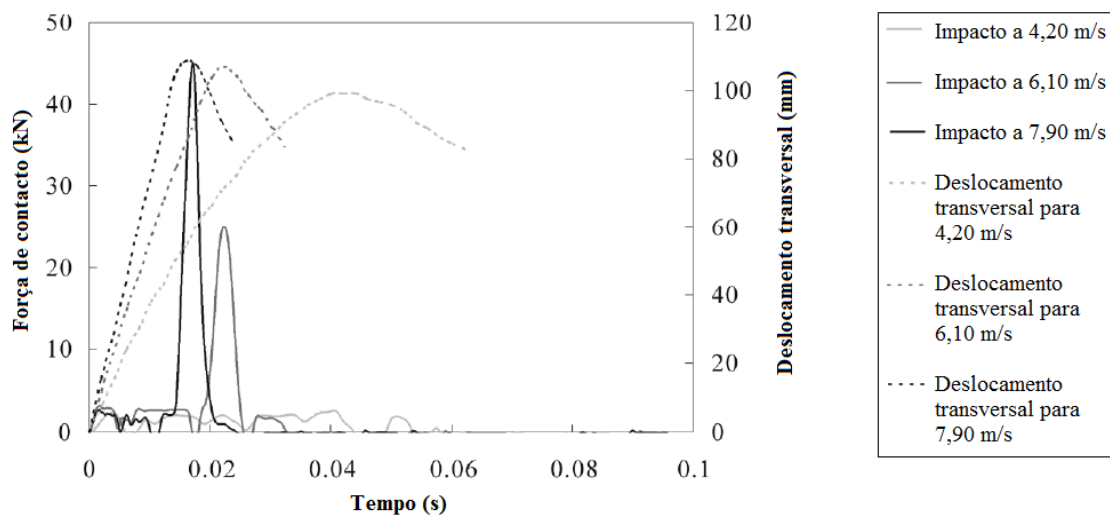



Figura 1.32 – Gráfico de deslocamentos do ensaio dinâmico (42).

Com estes gráficos é possível verificar que a força aplicada nos ensaio dinâmico é superior à força aplicada no ensaio quase estático.

Os gráficos de deslocamentos por sua vez estão presentes na figura 1.33 para o ensaio quase-estático e na figura 1.34 para o ensaio dinâmico.

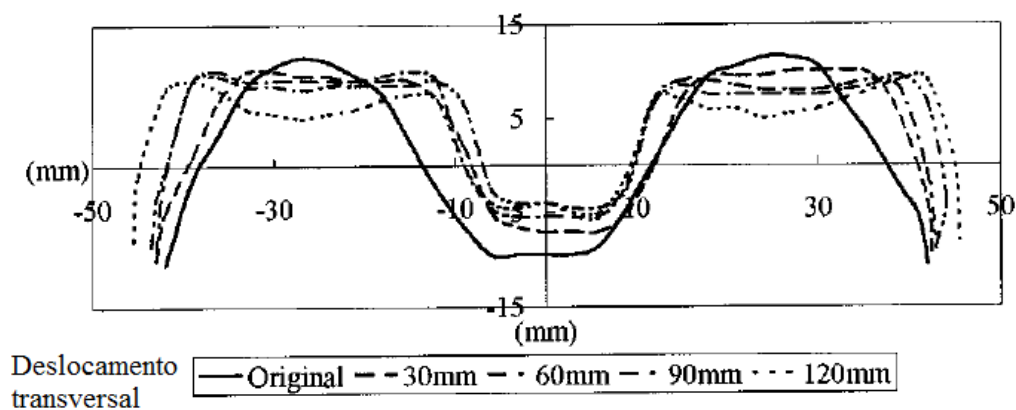



Figura 1.33 – Gráfico de deslocamentos do ensaio quase-estático (42).

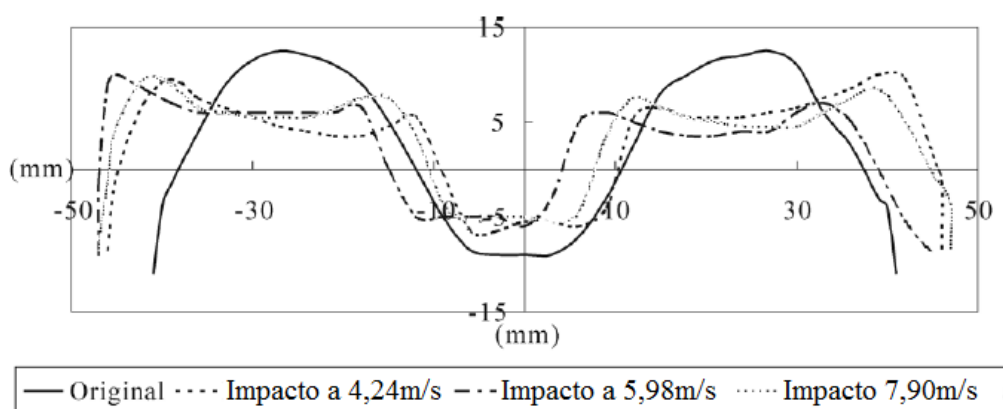



Figura 1.34 – Gráfico de deslocamentos do ensaio dinâmico (42).

Com as duas figuras anteriores, referente ao deslocamento da estrutura é possível verificar, que o deslocamento e consequente forma final da barra é bastante semelhante entre os dois ensaios, quase-estático e dinâmico respectivamente, como aliás é possível verificar em seguida na figura 1.35.

Na figura 1.35 apresenta-se o aspecto final das barras longitudinais em W após os ensaios.

a)

b)

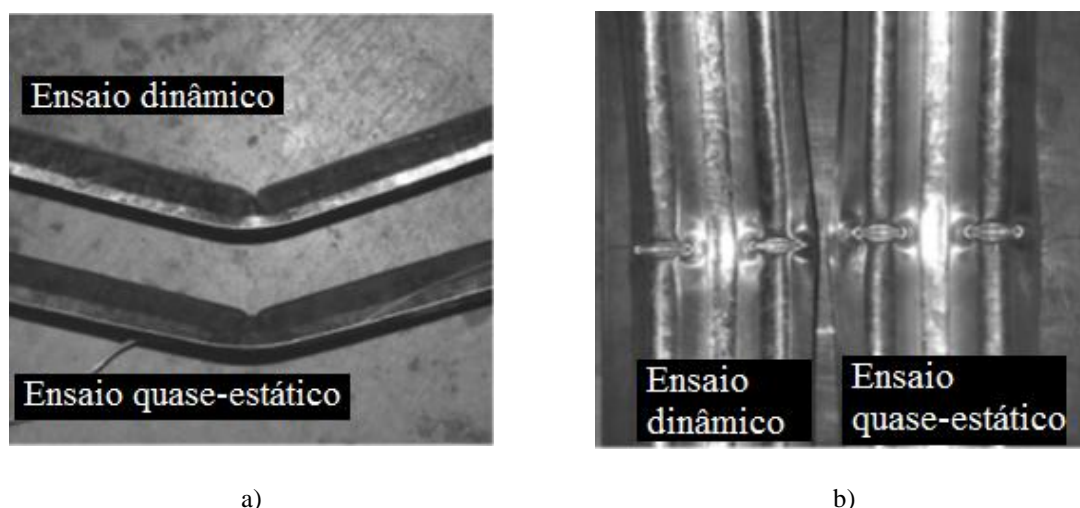



Figura 1.35 – (42) a) Vista de topo. b) Vista de frente.

O artigo "Large plastic deformation of w-beams used as guardrails on highways" (43), referente a dois dos autores do artigo (42) apresenta uma grande deformação plástica das barras W onde é executada a análise estática das mesmas. Tendo em conta o artigo analisado em cima (42) (posterior a este) é de salientar, devido à análise laboratorial efectuada adiante neste estudo, as características do material utilizado, com módulo de *Young* de 198,6 GPa e uma tensão de cedência de 380 MPa. Uma conclusão importante a retirar é que a forma como é feita a instalação da barra longitudinal nos suportes desempenha um papel fundamental na performance do sistema de retenção das barreiras de protecção rodoviária. Para comprovar esta afirmação o autor executa ensaios com diferentes tipos de suporte nas extremidades da barra longitudinal.

Hugo Miguel Lima (44) executa um estudo de uma estrutura alternativa, de betão híbrida, constituída também por cabos de aço na face anterior da barra. Pretende com esta estrutura proposta atingir um nível mais aceitável de comportamento da mesma, perante o embate tanto de veículos ligeiros como de pesados. Pretende que esta seja mais eficaz do que os existentes no mercado à data do seu estudo (2006).

O estudo verifica que de uma forma geral, o sistema funciona para solicitações de um veículo pesado de 16 toneladas, com algumas verificações a nível das ligações e dos cabos. No que respeita aos veículos ligeiros verifica-se um amortecimento da colisão quando comparado com o choque contra uma barreira encastrada (44).

O tipo de barreiras propostas por Lima (figura 1.36) aparenta ser uma alternativa mais eficaz que as populares e baratas barreiras metálicas em w, dupla onda (44). Aparenta ser também mais eficaz que as barreiras *New Jersey* abordadas anteriormente visto que o estudo parte por base de uma barreira de betão. Para finalizar é curioso verificar que as barreiras de betão híbridas, mencionadas anteriormente, e com informação importante presente no Anexo B datado de Maio de 2011, apresentam semelhanças com as barreiras desenvolvidas por Lima em 2006. Segundo a notícia (9), presente no Anexo B, parecem ter um comportamento mais eficaz, sendo portanto uma evolução nos sistemas de protecção rodoviária.

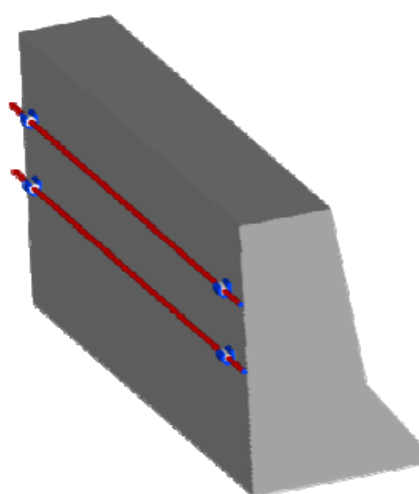



Figura 1.36 – Barreiras de betão híbridas propostas por Lima (44).

Em seguida são apresentados os fundamentos teóricos que possibilitam a compreensão do comportamento da estrutura analisada adiante neste trabalho.

1.8 Objectivo

Este trabalho tem como objectivo compreender o comportamento das actuais barreiras de protecção metálicas ao nível das ligações e verificar o seu comportamento à aplicação de força até à sua deformação plástica total.

O problema está relacionado com a incorrecta absorção da energia cinética do automóvel por via da deformação da barreira. Através da verificação local de situações de acidente constata-se que por vezes os veículos transpõem a mesma (figura 1.37) por má

fixação ao solo ou por incorrecto perda de ligação entre o prumo e espaçador. Noutras situações também se verifica o romper da ligação entre as várias barras longitudinais (37).

Figura 1.37 – Elementos constituintes de uma barreira de protecção rodoviária (3).

O objectivo prende-se então com a reprodução e análise de um exemplo numérico de modo a verificar o comportamento do mecanismo, onde se inicia o problema e se possível, encontrar uma solução para o mesmo.

O comportamento de materiais na zona de deformação plástica não é espectável como acontece na deformação elástica, onde por norma a linha de tensão-deformação é linear e onde o descarregamento se dá pela mesma linha de carregamento do elemento em estudo. Assim, como se pretende entrar no estudo do comportamento plástico, este trabalho recorre ao apoio numérico, através do programa *ANSYS*. O apoio numérico simplifica a reprodução e análise de qualquer problema que entre no domínio da plasticidade.

Este trabalho enquadra-se num projecto mais geral de modelar um sistema completo de barreiras de protecção, com o qual se consiga prever com maior exactidão o comportamento plástico dos diversos componentes de uma barreira metálica quando sujeitos à função para que estão previstos.

Para a concretização deste objectivo, cabe neste estudo a análise mais aprofundada dos elementos de ligação, concretamente o prumo e o espaçador para a obtenção da

informação suficiente que permite fornecer informação completa para posterior estudo do comportamento multicorpo do sistema completo.

Seguidamente é apresentada a fundamentação teórica que sustenta este trabalho, desde o nível prático ao numérico.

Nos capítulos seguintes são apresentadas as características do material em estudo, e a validação do programa de elementos finitos para análises de comportamento plástico. Por fim são executadas análises numéricas/simulação aos elementos de ligação em estudo, prumos e espaçador, comparando por fim a análise do espaçador ao ensaio experimental efectuado.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo visa a identificação e exposição da componente teórica na qual está baseada o trabalho efectuado em todo este estudo, tanto a nível real como numérico.

2.1 Análise do comportamento elástico e plástico do material

Este capítulo visa a identificação e compreensão do comportamento à deformação de qualquer material sob a acção de uma força. Nesta análise é possível dividir a deformação em duas formas distintas. São elas a deformação elástica e a deformação plástica.

O gráfico presente na figura 2.1 representa a relação de tensão-extensão (ou tensão-deformação) convencional que advém de um ensaio de tracção típico. (45)

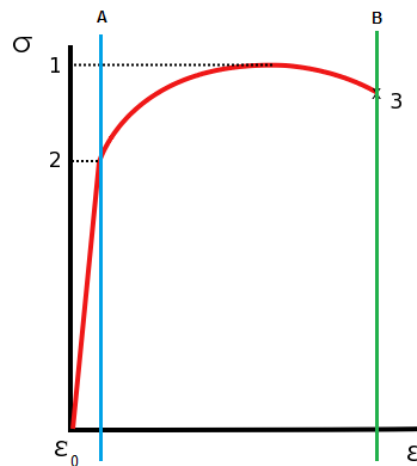



Figura 2.1 – Ensaio de tracção com tensão limite de elasticidade facilmente identificável.

Esta relação é apresentada pela linha [ε_0;2;1;3], denominada linha de carregamento. A linha A representa a transição elasto-plástica (transição entre o regime elástico e o plástico). O eixo das ordenadas refere os valores de tensão exercida, e o eixo das abcissas, os valores de extensão (ou deformação) produzidos no material.

No gráfico presente da figura 2.1 apresentam-se alguns pontos característicos como:

1. Tensão de rotura;
2. Tensão limite de elasticidade ou tensão de cedência;
3. Rotura/fractura do material.

A tensão (σ) apresentada no gráfico (figura 2.1) é obtida através da equação (2.1).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \qquad (2.1)$$

A extensão (ε) é adimensional, e por sua vez é obtida através da equação (2.2).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \qquad (2.2)$$

Diferentes materiais têm diferentes comportamentos quando sujeitos a um ensaio de tracção.

A figura 2.1 por sua vez demonstra as diferentes formas de um provete ao longo do ensaio de tracção, de um material tipicamente dúctil.

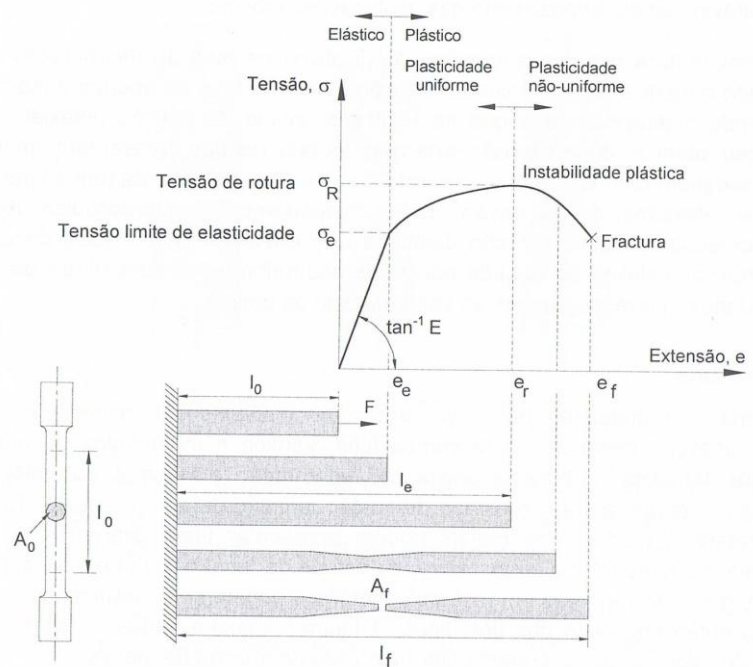



Figura 2.2 – Diferentes fases de um ensaio de tracção (10).

2.1.1 Deformação elástica

A deformação elástica é o primeiro estado de deformação a que qualquer material elástico pode estar sujeito. É preciso que este passe pela deformação elástica antes de atingir a deformação plástica.

A lei de *Hooke*, equação (2.3), define matematicamente o comportamento elástico de um determinado material. Com esta é possível obter o Módulo de Young (*E*), ou também denominado, módulo de elasticidade longitudinal, de determinado material, que permite identificar a relação tensão-extensão (representada pela linha de carregamento) dentro do domínio elástico.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{2.3}$$

A principal característica do regime elástico é que a linha de carregamento e descarregamento do material são as mesmas. Assim sendo não existe deformação final do material após o descarregamento. Contudo existem ensaios de tracção em que a transição elasto-plástica não é facilmente identificável, pelo que é necessário traçar uma linha paralela à linha de carregamento inicial com o mesmo declive do Módulo de *Young* (*E*) do material a uma proporção de 0,2% (por convenção, valor a partir do qual o material sofre deformação plástica) de deformação (46). Neste caso o recuo, considerado ainda elástico já possui uma deformação de 0,02, portanto, não segue a linha de carregamento (figura 2.3).

As figuras seguintes representam outras curvas típicas de um ensaio de tracção (45).

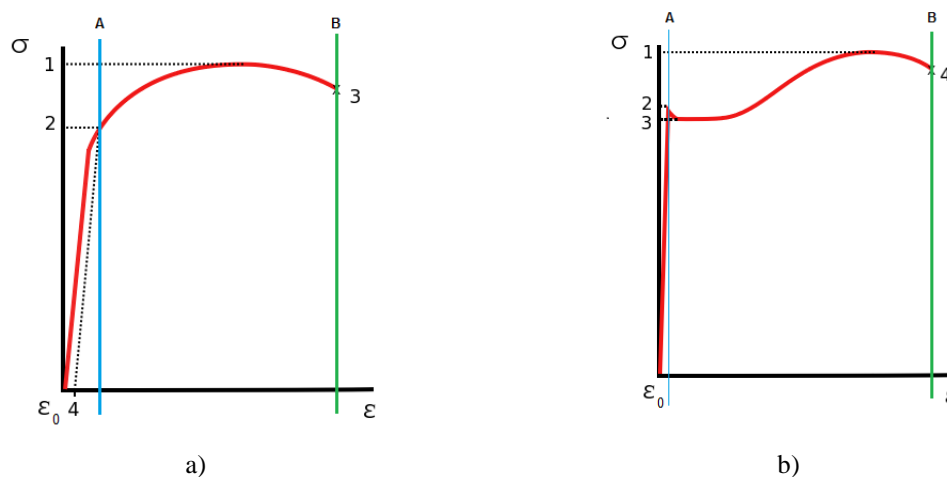



Figura 2.3 – Outras curvas típicas de um ensaio de tracção. a) Com tensão limite de elasticidade a 0,2%. b) Ensaio de tracção com patamar de cedência.

O gráfico presente na figura 2.3 a, apresenta ligeiras diferenças em relação ao da figura 2.1. O ponto 2 representa também a tensão de cedência, mas a uma

proporcionalidade de 0,2%, sendo que o ponto 4 representa uma deformação definitiva do material (0,002) correspondente à tensão do ponto 2.

Finalmente o gráfico presente na figura 2.3 b, apresenta um patamar de cedência, constituído por uma tensão de cedência superior (ponto 2) e uma tensão de cedência inferior (ponto 3). A transição elasto-plástica dá-se no ponto 2.

A capacidade de absorção de energia do regime elástico, denominada resiliência, é por norma inferior à da deformação plástica (tenacidade). Essa mesma capacidade mede-se através da dimensão da área abaixo da respectiva linha de carregamento. Como é possível verificar por exemplo na figura 2.3 a área abaixo da linha de carregamento [ε_0;2;1;3] e anterior linha de transição elasto-plástica (linha A) é inferior à área posterior a esta que termina na linha B. É também possível verificar estas mesmas áreas na figura 2.4, onde a resiliência está representada a verde e a tenacidade a rosa, para dois materiais distintos, com comportamento tipicamente frágil e dúctil.

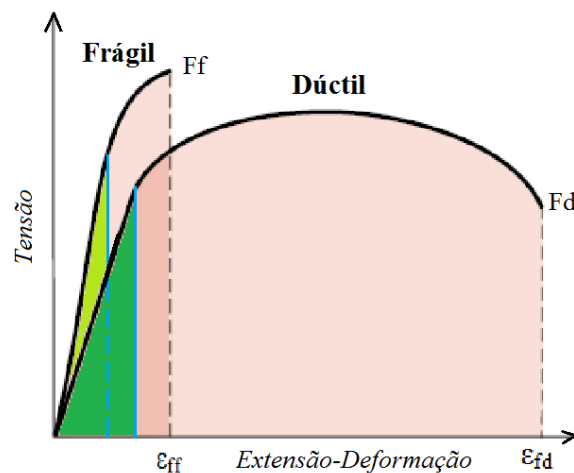



Figura 2.4 – Resiliência e tenacidade de materiais frágeis e dúcteis.

Onde (46):

F_f – Ponto de fractura do material frágil;

ε_{ff} – Extensão total do material frágil no instante anterior à fractura do material;

F_d – Ponto de fractura do material dúctil;

ε_{fd} – Extensão total do material dúctil no instante anterior à fractura do material.

É possível calcular matematicamente o valor da resiliência, denominado módulo de resiliência (U_r), através da equação (2.4).

$$U_r = \frac{\sigma_c^2}{2E} \tag{2.4}$$

Como é possível verificar na figura 2.4, o material tipicamente dúctil apresenta melhores características para a absorção de energia através da sua maior capacidade de deformação.

2.1.2 Deformação plástica

A deformação plástica alberga aspectos particulares como o efeito de *Bauschinger*, encruamento, anisotropia, entre outros (47). De modo a facilitar o cálculo matemático, o comportamento anisotrópico (deformações consoante as diferentes propriedades físicas nas diferentes direcções), é ignorado e considerado como isotrópico (deformações consoante as semelhantes propriedades físicas em todas as direcções). Para o material a tratar, o aço, a análise isotrópica fornece resultados válidos. A figura 2.5 apresenta o comportamento de um material isotrópico, para a posição inicial e final, nas diferentes direcções.

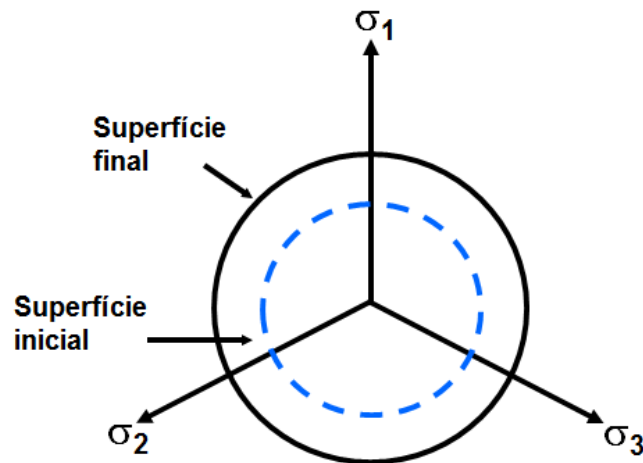



Figura 2.5 – Superfície inicial e final nas diferentes direcções. Comportamento semelhante (14).

Dentro da isotropia existe contudo o coeficiente de *Poisson* (υ) que indica a relação entre a deformação transversal em relação à direcção de aplicação da carga, tendo portanto um valor adimensional. A equação (2.5) representa o cálculo deste coeficiente.

$$\upsilon = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_y} \quad (2.5)$$

É também através da deformação plástica que se procede conformação de materiais, dando-lhe a forma pretendida através da deformação do material.

O comportamento de um material sujeito a deformação plástica é descrito pela sua curva de tensão-extensão. Este entra no domínio plástico (existência de deformação plástica) quando excede a tensão de cedência. A partir da tensão de cedência as deformações produzidas no material tornam-se definitivas.

A linha de descarregamento por sua vez, não se dá na perpendicular ao eixo da extensão como seria de esperar (segmento ac), mas sim de acordo com o declive correspondente ao módulo de *Young*, pois existe sempre a recuperação elástica do material quando descarregado, seja antes ou depois da fractura. Assim o descarregamento dá-se paralelamente à linha de carregamento dentro da elasticidade (segmento ab), como é possível verificar na figura 2.6.

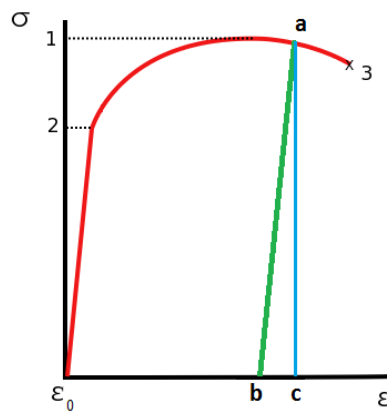



Figura 2.6 – Ilustração da linha de descarregamento (linha verde, segmento ab).

A capacidade de absorção de energia no domínio plástico, tenacidade, é um parâmetro difícil de definir (47), mas pode ser avaliada considerando toda a área abaixo da linha de carregamento do ensaio de tracção na zona plástica. Portanto, embora existam dois conceitos, resiliência e tenacidade, quando um material sofre deformação plástica considera-se toda a capacidade de absorção de energia como tenacidade, sem distinção entre domínio elástico e plástico.

Para além da medição da área abaixo da curva tensão-extensão existe também a possibilidade de cálculos analíticos aproximados. Existe uma distinção prévia, do cálculo analítico da tenacidade, para materiais frágeis e dúcteis, sendo do interesse deste trabalho os materiais dúcteis, no qual se enquadra o aço de construção, objecto de estudo deste trabalho.

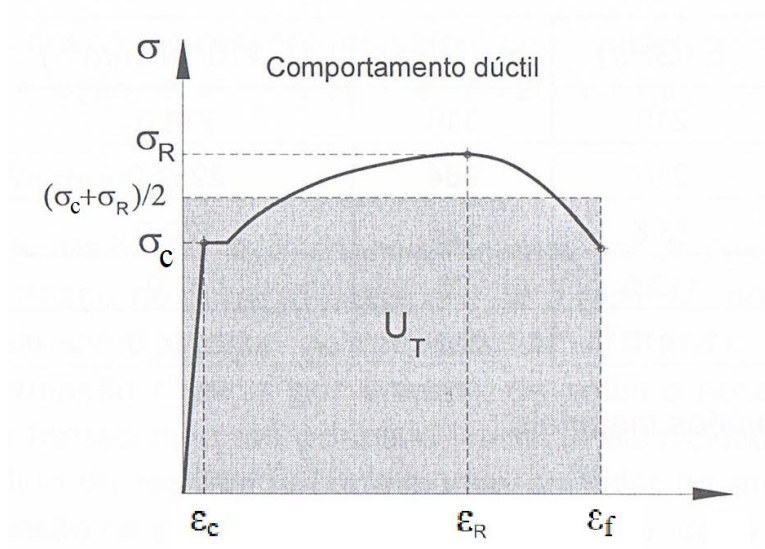



Figura 2.7 – Ilustração do cálculo aproximado da tenacidade (10).

Neste princípio a equação (2.6) apresenta o cálculo aproximado do módulo de tenacidade (U_T) de um material dúctil.

$$U_T = \frac{\sigma_r + \sigma_c}{2} \cdot \varepsilon_f \qquad (2.6)$$

2.1.3 Tensão e extensão verdadeira

O comportamento do material no domínio plástico tal como é apresentado no ensaio de tracção, não reflecte o verdadeiro comportamento do material.

A curva tensão-deformação resultante do ensaio de tracção representa o comportamento do material em estudo, considerando uma secção constante do início ao fim do ensaio, algo que não acontece na realidade. O que ocorre na realidade é uma variação da secção do provete durante todo o ensaio, principalmente durante a deformação plástica. Desta forma, embora a tensão aumente até à tensão de rotura e diminua desta até à fractura, na realidade a secção do provete vai diminuindo, pelo que a tensão localizada na área de estricção vai aumentando e o comportamento da curva é de

aumento durante todo o ensaio. Como a tensão representa uma força sobre área, embora a força diminua, a área correspondente também diminui, pelo que a tensão acaba por aumentar. A extensão também necessita de ser ajustada, visto que existe uma variação da secção do provete em todas as direcções. Assim sendo existem critérios de correcção desta curva, denominada curva de engenharia, para a curva tensão-deformação verdadeira.

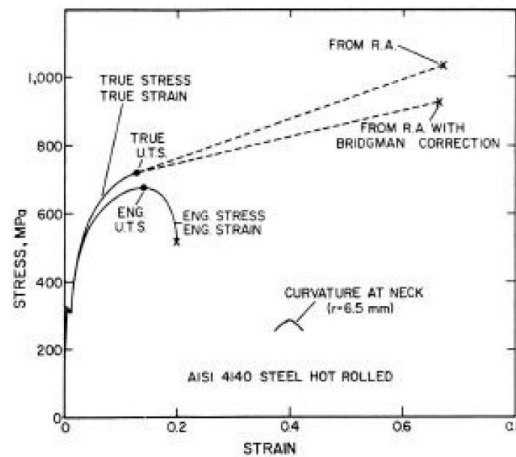



Figura 2.8 – Exemplo de diferença entre a curva de engenharia e a verdadeira para um aço AISI 4140 conformado a quente (48).

A diferença entre estas dentro do domínio elástico é muito baixo, pelo que não se procede ao ajustamento da linha.

Dentro do domínio plástico, é necessário proceder ao reajustamento da linha. Neste domínio são consideradas duas zonas distintas. A primeira é a zona de deformação uniforme, até à tensão de rotura, e a zona de deformação não uniforme, com início na tensão de rotura e fim no instante de fractura do material.

Na zona de deformação plástica uniforme, o ajustamento da tensão é elaborado pela equação (2.7) (10).

$$\sigma_v = \sigma_{eng} \cdot \left(1 + \varepsilon_{eng}\right) \tag{2.7}$$

A extensão na zona de deformação plástica uniforme, também necessita de ser reajustada. Este é elaborado pela equação (2.8) (10).

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \tag{2.8}$$

Após a tensão de rotura a curva entra na zona de deformação plástica não uniforme. Nesta zona inicia-se a estricção da secção do provete, existindo deformação localizada, em todas as direcções, na região onde irá ocorrer a fractura. Nesta o reajustamento é feito através de outra equação (2.9), que tem em conta a variação de secção.

Assim, para o cálculo da tensão a cada instante recorre-se à equação (2.9) até à fractura do provete (10).

$$\sigma_v = \frac{F}{A} \tag{2.9}$$

A extensão nesta zona de deformação plástica não uniforme é obtida também de acordo com a variação dimensional do provete. Utiliza-se esta equação (2.10) até à fractura do mesmo (10).

$$\varepsilon_v = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \tag{2.10}$$

Contudo, na região onde ocorre a estricção do provete é necessário efectuar reajustamentos à equação (2.9), variando com o número de eixos em que é feito o ensaio. Isto acontece devido à alteração dimensional em todas as direcções.

Assim sendo, para um teste uniaxial a tensão real, aquando a existência de estricção é também ela reajustada. Desta forma, o valor da tensão que interessa para este trabalho é obtido através da relação presente na equação (2.11) presenta na referência (10).

$$\sigma_{v-e} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sigma_v \tag{2.11}$$

É necessário realçar que é possível utilizar as equações (2.9) e (2.10) para descrever toda a curva, ou seja, também é possível aplicar as mesmas na zona plástica de deformação uniforme. Obter-se-ão resultados ainda mais precisos, contudo a aproximação logarítmica é suficiente e menos complicada de executar.

Com todas as equações de reajustamento presentes em cima, é possível criar ponto a ponto a curva real do material que se pretende analisar. Contudo são necessárias medições

instantâneas da variação das dimensões do provete em todas as direcções, para uma correcta descrição.

Existem outros métodos de obtenção da curva real do material no domínio plástico, que têm em conta parâmetros inerentes a cada material, e que se encontram tabelados, ou que se obtêm também eles através da análise instantânea da variação da secção durante o ensaio de tracção. Existem mais do que uma equação para a descrição da curva verdadeira, formuladas por diferentes autores.

A equação de *Hollomon* (2.12) (47).

$$\sigma_v = K \cdot \varepsilon_v{}^n \tag{2.12}$$

A equação de *Swift* (2.13) (47).

$$\sigma_v = K \cdot (\varepsilon_c + \varepsilon_v)^n \tag{2.13}$$

A equação de *Ludwik* (2.14) (47).

$$\sigma_v = \sigma_c + K \cdot \varepsilon_v{}^n \tag{2.14}$$

Embora equações como a de *Swift* e *Ludwik* sejam matematicamente mais complicadas que a de *Hollomon*, e nomeadamente a de *Ludwik* produza resultados mais rigorosos, na maior parte dos casos a equação de *Hollomon* é suficientemente exacta para descrever a curva de tensão-extensão verdadeira (47).

Por fim, uma equação (2.15) simples que será necessária adiante neste estudo (47).

$$\varepsilon_{Pl} = \varepsilon_T - \varepsilon_{El} \tag{2.15}$$

2.2 Simulação

A simulação levada a cargo pelo programa de elementos finitos *ANSYS*, tem a possibilidade de ser alterada através de diferentes configurações.

Cada um dos elementos, como o presente na figura 2.9, têm definições próprias e configurações passíveis de serem alteradas.

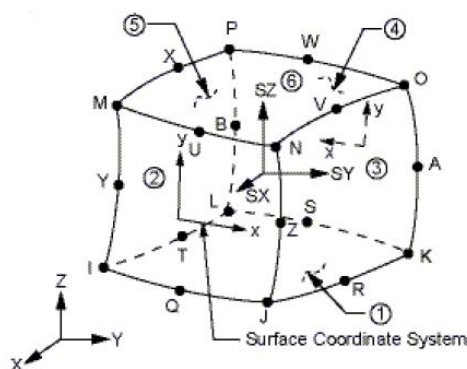



Figura 2.9 – Elemento SOLID186 3-D de 20 nós (16).

O exemplo da figura 2.9 define-se com um elemento de elevada ordem, de três dimensões, 20 nós, com três graus de liberdade por nó. Suporta plasticidade, deflexão elevada e elevada capacidade de extensão, entre outras características. Algumas destas definições permitem a escolha de diferentes configurações, por opção, através de instruções de comando (“KEYOPT”) (figura 2.10).

```
ELEMENT TYPE      1 IS SOLID186     3-D 20-NODE STRUCTURAL SOLID
 KEYOPT( 1- 6)=        0      1      0        0       0       0
 KEYOPT( 7-12)=        0      0      0        0       0       0
 KEYOPT(13-18)=        0      0      0        0       0       0
```

Figura 2.10 – Configuração do elemento sob a forma de comando.

No exemplo da figura 2.10, exceptuando uma KEYOPT, todas as restantes estão tomadas como zero, portanto a configuração tomada por defeito.

Para o elemento SOLID186 a KEYOPT(2) (a que apresenta o valor de 1) define que a tecnologia de elementos utilizada durante a simulação será de integração total (máximo número de pontos de descrição do elemento considerados na sua análise), ao invés da opção de defeito (que se apresentaria pelo valor de 0) que utiliza uma tecnologia de integração reduzida uniforme (mínimo número de pontos de descrição do elemento considerados na sua análise).

Para este elemento SOLID186, a diferença está em 6 pontos de integração, pois a opção reduzida considera 8 pontos (2x2x2 (x,y,z)) e 14 para integração total, pois o é a consideração que o *ANSYS* faz para integração total ao invés dos supostos 27 (3x3x3), daí a indicação de “*”, presente na tabela 2.1 que apresenta a comparação entre pontos de integração para alguns elementos (14).

Tabela 2.1 – Comparação de pontos de integração entre elementos (14).

Tipo de elemento	Pontos de integração (x,y,z)	Integração	N.º final de pontos
8 Nós - Hexaedro	2 x 2 x 2	Reduzida	8
20 Nós - Hexaedro	3 x 3 x 3 *	Total	14

Esta KEYOPT(2) é apenas um exemplo das possibilidades de alteração dos elementos existentes no programa. Para cada elemento, apenas existe a possibilidade de alterar algumas destas KEYOPT, nem todas elas têm propriedades para todos os elementos. No exemplo do SOLID186, para opção elemento sólido estrutural homogéneo (visto que existe também a opção de SOLID186 em camadas), apenas as KEYOPT (2), (3) e (6) têm definições intrínsecas.

A opção de integração total para este elemento SOLID186 de elevada ordem traz na prática resultados que podem ser mais apurados, consoante a geometria da peça, visto que um maior número de pontos de integração é inerente o maior número de equações a serem calculadas, representando um comportamento mais apurado. Esta opção traz também um incremento do tempo de análise levado a cabo pelo programa. Contudo o que é mais importante verificar são as causas que podem tornar a opção não apropriada.

A opção de integração reduzida pode provocar um fenómeno que apresenta uma solução defeituosa, aparentando falta de rigidez da estrutura e superfície irregular o denominado "*hourglassing*" (figura 2.11), se a estrutura não tiver pelo menos duas camadas de elementos em cada direcção (16).

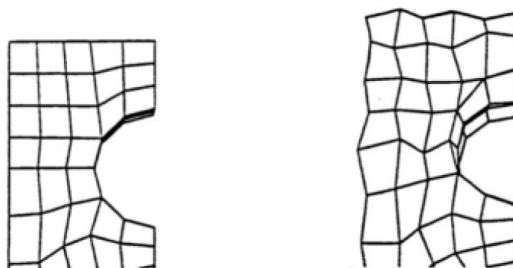



Figura 2.11 – Fenómeno de "*hourglassing*" à direita (16).

A opção de integração total por sua vez pode provocar um fenómeno que se define com um bloqueio da deformação da estrutura, aparentando uma rigidez exagerada,

denominando-se "*volumetric locking*" (bloqueio volumétrico). Contudo, para elementos de elevada ordem como o SOLID186, só é propício que tal aconteça para materiais com coeficiente de *Poisson* próximo ou igual a 0,5 (14).

2.2.1 Critério de plasticidade *von Mises*

Um dos aspectos mais importantes da teoria da plasticidade é pois o de se estabelecerem relações que permitam conhecer as condições de entrada em domínio plástico de um material, quando sujeito a uma combinação arbitrária de tensões. Se as deformações fossem do tipo uniaxial, como é por exemplo o caso do ensaio de tracção, seria fácil determinar o início da deformação plástica do material, todavia, a generalidade dos processos tecnológicos de deformação plástica envolve estados de tensão do tipo biaxial ou triaxial e o problema torna-se mais complexo, dando origem a que tenham que existir critérios de plasticidade no sentido lato do conceito (10).

Os critérios de plasticidade são essencialmente relações empíricas comprovadas por um conjunto consistente de ensaios experimentais (10).

O critério de plasticidade de *von Mises* considera que a deformação plástica tem início quando o valor da energia elástica de distorção por unidade de volume (W_d^e) atinge um valor crítico (equação (2.16)) (10).

$$W_d^e = \frac{J_2}{2 \cdot G} \geq W_{crítico} \tag{2.16}$$

Na equação (2.16) J_2 representa o segundo invariante do tensor desviador das tensões, o qual é dado pela equação (2.17) (10).

$$J_2 = \frac{1}{6} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \tag{2.17}$$

A determinação do valor crítico da energia elástica de distorção por unidade de volume efectua-se considerando o início da deformação plástica de um estado de tracção uniaxial, $\sigma_1 = \sigma_2$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ é obtido pela equação (2.18) (10).

$$W_{crítico} = \frac{1}{6 \cdot G} \cdot {\sigma_c}^2 \tag{2.18}$$

Substituindo este resultado (obtido na equação (2.18)) na equação (2.16) e considerando a definição do segundo invariante do tensor desviador das tensões (equação (2.17)), obtém-se a seguinte forma para o critério de *von Mises* (equação (2.19)) (10).

$$2 \cdot {\sigma_c}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \tag{2.19}$$

É importante salientar que o critério de plasticidade de *von Mises*, ao contrário do critério de *Tresca*, considera a influência da tensão intermédia, σ_2, sobre o limite de elasticidade. A representação do critério de *von Mises* no plano de Mohr é bastante mais complexa que a do critério de *Tresca* (10).

A tensão intermédia (σ_2) para o ponto de estacionaridade é obtida pela equação (2.20) (10).

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \tag{2.20}$$

Contudo, esta tensão intermédia tem a possibilidade de variar até aos dois pontos extremos, tomando os valores presentes na equação (2.21) (10).

$$\sigma_2 = \sigma_1 \ \ \text{V} \ \ \sigma_2 = \sigma_3 \tag{2.21}$$

Para representar no plano de Mohr a diferença entre os dois estados de tensão de corte octaedral crítica ($(\tau_{oct})_{crítica}$), basta calcular a tensão de corte máxima (τ_{max}), associada a cada um deles. Para σ_2 obtida pela equação (2.20), esta é obtida através da equação (2.22) (10).

$$\tau_{max} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot (\tau_{oct})_{crítica} \tag{2.22}$$

Para σ_2 obtida pela equação (2.21), a tensão de corte máxima (τ_{max}) é obtida pela equação (2.23) (10).

$$\tau_{max} = \frac{3\sqrt{2}}{4} \cdot (\tau_{oct})_{crítica} \tag{2.23}$$

A figura 2.12 apresenta o plano de Mohr com variação de tensão de corte máxima.

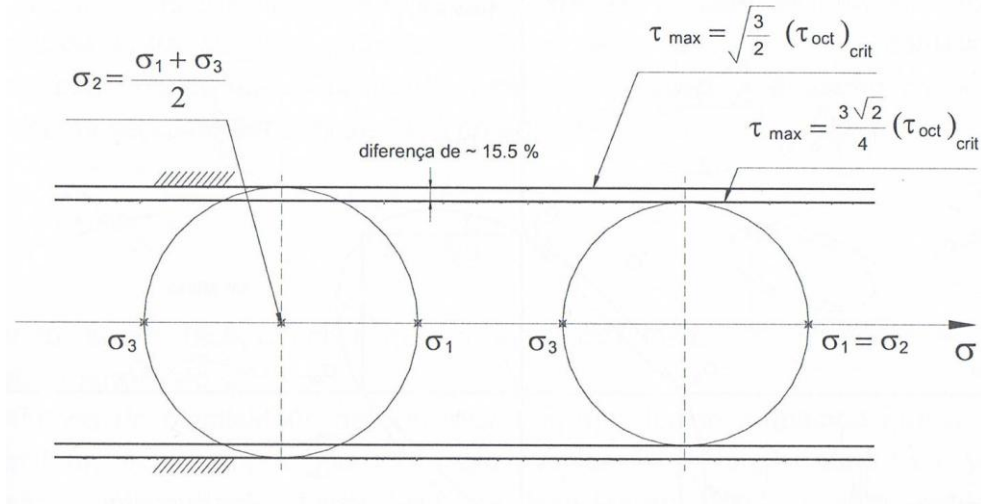



Figura 2.12 – Representação do critério de *von Mises* no plano de Mohr (10).

Esta diferença na tensão de corte máxima, tendo em conta os valores da tensão intermédia podem chegar a uma diferença de 15,5% como se pode verificar na equação (2.24) (10).

$$\frac{(\tau_{max})_{maior}}{(\tau_{max})_{menor}} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot (\tau_{oct})_{crítica}}{\frac{3\sqrt{2}}{4} \cdot (\tau_{oct})_{crítica}} = 1{,}155 \qquad (2.24)$$

A figura 2.13 ilustra a diferença entre os critérios de plasticidade de *Tresca* e *von Mises*.

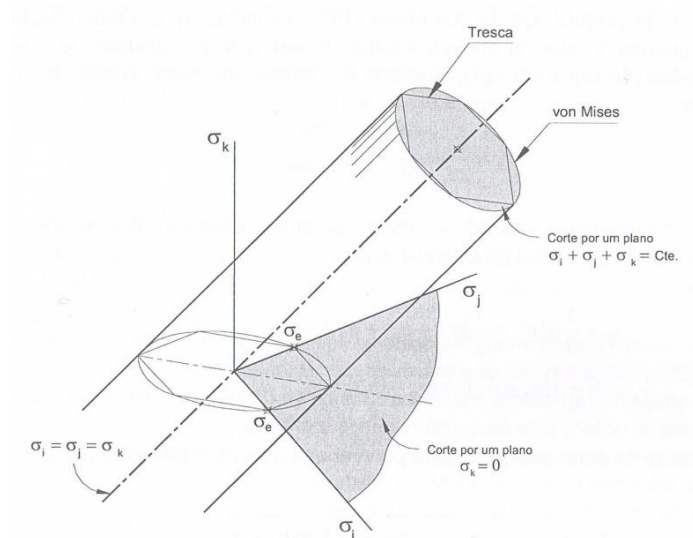



Figura 2.13 – Critérios de elasticidade de *Tresca* e de *von Mises* num espaço tridimensional (10).

Como é possível verificar na figura 2.13 as transições para o critério de *Tresca* são definidas por uma recta, sendo descritas de forma elíptica para o critério de *von Mises*.

Verifica-se que para estados de tensão de corte puro, a diferença entre o critério de *Tresca* e de *von Mises* é de aproximadamente 15,5%, com a tensão limite de elasticidade em corte puro (k) a ser obtida pela equação (2.25) para o critério de *Tresca* (10).

$$k = \frac{\sigma_c}{2} \tag{2.25}$$

Para o critério de *von Mises* a tensão limite de elasticidade para corte puro é obtida pela equação (2.26) (10).

$$k = \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} \tag{2.26}$$

Por sua vez, as equações de Levi-Mises constitutivas para o domínio plástico encontram-se presentes nas equações (2.27) (10).

$$\begin{gathered}
d\varepsilon_x^p = \frac{d\varepsilon_e{}^p}{\sigma_e} \cdot \left[\sigma_x - \frac{1}{2} \cdot \left(\sigma_y \cdot \sigma_z\right)\right] \\
d\varepsilon_y^p = \frac{d\varepsilon_e{}^p}{\sigma_e} \cdot \left[\sigma_y - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_z \cdot \sigma_x)\right] \\
d\varepsilon_z^p = \frac{d\varepsilon_e{}^p}{\sigma_e} \cdot \left[\sigma_z - \frac{1}{2} \cdot \left(\sigma_x \cdot \sigma_y\right)\right] \\
d\varepsilon_{xy}^p = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_e{}^p}{\sigma_e} \cdot \tau_{xy} \\
d\varepsilon_{yz}^p = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_e{}^p}{\sigma_e} \cdot \tau_{yz} \\
d\varepsilon_{zx}^p = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_e{}^p}{\sigma_e} \cdot \tau_{zx}
\end{gathered} \tag{2.27}$$

De salientar que as equações (2.27), conhecidas por equações de Levy-Mises, são função do invariante quadrático do tensões desviador de tensões, J_2 (obtido através da equação (2.17)), o que significa que o critério de plasticidade de *von Mises* seja aplicável (10).

Por fim, os resultados obtidos adiante na simulação numérica são entre outros, apresentados na forma de "tensão equivalente". Esta mesma tensão é calculada através da equação (16).

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}\right]^{1/2} \tag{2.28}$$

Esta "tensão equivalente" ou "tensão de *von Mises*" é usualmente utilizada nas análises numéricas porque permite que qualquer estado de tensão tridimensional possa ser representado com um único valor de tensão (16).

2.2.2 Formulação dos elementos – Deslocamento puro

Umas das opções que se pode alterar no estudo de um elemento é a formulação utilizada na análise, através da KEYOPT(6). Essa formulação tem como opção padrão o deslocamento puro (Pure Displacement Formulation), a qual é utilizada em todas as análises presentes neste estudo.

Esta formulação só tem em conta deslocamentos ou velocidades como variáveis primárias desconhecidas (16). Tensões e deformações, entre outros são derivadas dos deslocamentos (16). A equação (2.29) é obtida através da conjugação de outras equações, consistindo na formulação final do deslocamento puro.

$$D\,\delta W = \int_V \delta e_{ij} \cdot C_{ijkl} \cdot De_{kl}\, dV + \int_V \sigma_{ij} \cdot \left(\frac{\partial \delta u_k}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial D u_k}{\partial X_j} - \delta e_{ik} \cdot De_{kj}\right) dV \tag{2.29}$$

É a formulação mais amplamente utilizada, sendo capaz de suportar a maior parte dos problemas de deformação não linear (16).

2.2.3 Elementos

O estudo numérico do comportamento dos elementos é efectuado através dos nós e pontos de integração (definição do elemento).

Para qualquer elemento estrutural, a os deslocamentos (u) são obtidos através dos nós (a preto na figura 2.14). As tensões e extensões (σ, ε) são obtidas através dos pontos de integração (a vermelho na figura 2.14).

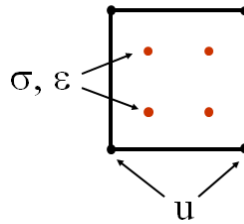



Figura 2.14 – Exemplo de um elemento plano (2x2 pontos de integração, a vermelho) (14).

A partir dos deslocamentos é possível obter por exemplo as extensões ocorridas, através da equação (2.30) (14).

$$\{\varepsilon\} = [\boldsymbol{B}]\,\{u\} \tag{2.30}$$

2.2.3.1 SOLID186

O elemento SOLID186 utilizado na validação do programa de elementos finitos utilizado, presente na figura 2.15, define-se com um elemento de elevada ordem, de três dimensões, 20 nós, com três graus de liberdade por nó.

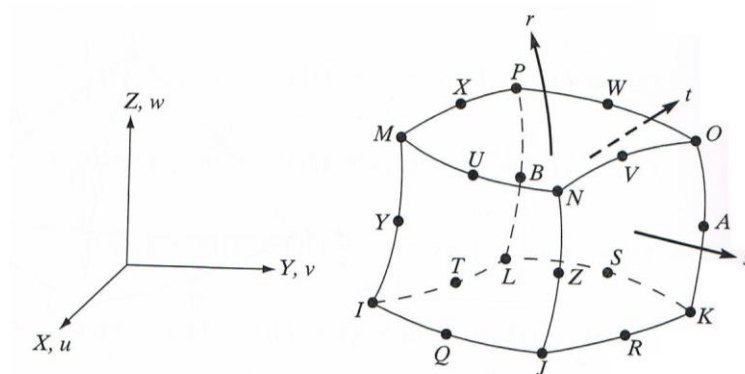



Figura 2.15 – Elemento SOLID186 3-D de 20 nós (49).

Para problemas de mecânica de sólidos, a formulação inerente ao estudo do seu comportamento está presente nas equações (2.31), (2.32) e (2.33) que representam as suas funções de forma. Nestas equações, u, v, w, representam respectivamente os deslocamentos em x, y, z (49).

$$u = \frac{1}{8} \cdot \left[u_I \cdot (1-s) \cdot (1-t) \cdot (1-r) \cdot (-s-t-r-2) + u_J \cdot (1+s) \cdot (1-t) \cdot (1-r) \cdot (s-t-r-2)\right] + \frac{1}{8} \cdot [u_K \cdot (1+s) \cdot (1+t) \cdot (1-r) \cdot (s+t-r-2) + u_L \cdot (1-s) \cdot (1+t) \cdot (1-r) \cdot (-s+t-r-2)] + \frac{1}{8} \cdot [u_M \cdot (1-s) \cdot (1-t) \cdot (1+r) \cdot (-s-t+r-2) + u_N \cdot (1+s) \cdot (1-t) \cdot (1+r) \cdot (s-t+r-2)] + \frac{1}{8} \cdot [u_O \cdot (1+s) \cdot (1+t) \cdot (1+r) \cdot (s+t+r-2) + u_P \cdot (1-s) \cdot (1+t) \cdot (1+r) \cdot (-s+t+r-2)] + \frac{1}{4} \cdot \left[u_Q \cdot (1-s^2) \cdot (1-t) \cdot (1-r) + u_R \cdot (1+s) \cdot (1-t^2) \cdot (1-r)\right] + \frac{1}{4} \cdot [u_S \cdot (1-s^2) \cdot (1+t) \cdot (1-r) + u_T \cdot (1-s) \cdot (1-t^2) \cdot (1-r)] + \frac{1}{4} \cdot [u_U \cdot (1-s^2) \cdot (1-t) \cdot (1+r) + u_V \cdot (1+s) \cdot (1-t^2) \cdot (1+r)] + \frac{1}{4} \cdot [u_w \cdot (1-s^2) \cdot (1+t) \cdot (1+r) + u_x \cdot (1-s) \cdot (1-t^2) \cdot (1+r)] + \frac{1}{4} \cdot [u_Y \cdot (1-s) \cdot (1-t) \cdot (1-r^2) + u_Z \cdot (1+s) \cdot (1-t) \cdot (1-r^2)] + \frac{1}{4} \cdot [u_A \cdot (1+s) \cdot (1+t) \cdot (1-r^2) + u_B \cdot (1-s) \cdot (1+t) \cdot (1-r^2)] \tag{2.31}$$

Analogamente para o deslocamento em v (equação (2.32)) (49).

$$v = \frac{1}{8} \cdot \left[v_I \cdot (1-s) \cdot (1-t) \cdot (1-r) \cdot (-s-t-r-2) + v_J \cdot (1+s) \cdot (1-t) \cdot (1-r) \cdot (s-t-r-2)\right] + \ \dots \tag{2.32}$$

Analogamente para o deslocamento em w (equação (2.33)) (49).

$$w = \frac{1}{8} \cdot \left[w_I \cdot (1-s) \cdot (1-t) \cdot (1-r) \cdot (-s-t-r-2) + w_J \cdot (1+s) \cdot (1-t) \cdot (1-r) \cdot (s-t-r-2)\right] + \ \dots \tag{2.33}$$

Este elemento é mais preciso para a modelação de estruturas com fronteiras curvas que o elemento de 8 nós (49). Suporta deformação, plasticidade, deflexão elevada e elevada capacidade de extensão, entre outras características (16).

2.2.3.2 SOLID187

O elemento utilizado na análise numérica das três estruturas finais, dois prumos e um espaçador, é o elemento SOLID187.

Segundo a referência (16), este é um elemento 3D de ordem elevada, constituído por 10 nós, tendo 3 graus de liberdade em cada nó. Permite deformação nodal em todos os eixos, e é especialmente aplicável em estruturas irregulares, que consequentemente serão constituídos por uma malha irregular.

O elemento encontra-se representado geometricamente na figura 2.16.

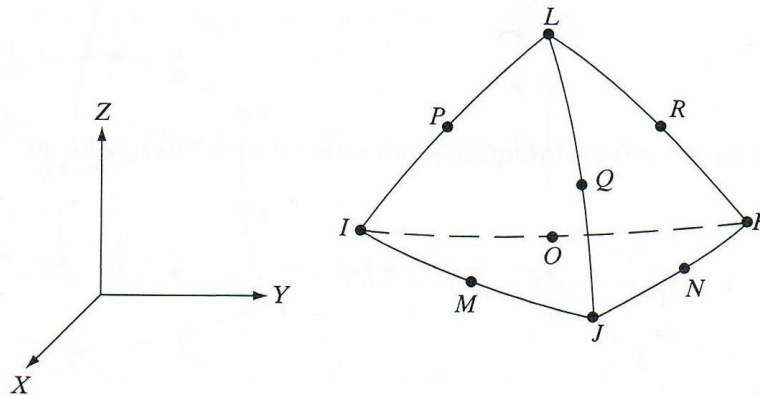



Figura 2.16 – Representação geométrica do elemento SOLID187, um tetraedro de 10 nós (49).

Para problemas de mecânica de sólidos, o deslocamento é representado pelas equações (2.34), (2.35) e (2.36) que representam as suas funções de forma. Nestas equações, u, v, w, representam respectivamente os deslocamentos em x, y, z (49).

$$u = u_I \cdot (2 \cdot S_1 - 1) \cdot S_1 + u_J \cdot (2 \cdot S_2 - 1) \cdot S_2 + u_K \cdot (2 \cdot S_3 - 1) \cdot S_3 + u_L \cdot (2 \cdot S_4 - 1) \cdot S_4 + 4 \cdot \left(u_M \cdot S_1 \cdot S_2 + u_N \cdot S_2 \cdot S_3 + u_O \cdot S_1 \cdot S_3 + u_P \cdot S_1 \cdot S_4 + u_Q \cdot S_2 \cdot S_4 + u_R \cdot S_3 \cdot S_4\right) \quad (2.34)$$

Analogamente para v (equação (2.35)) (49).

$$v = v_I \cdot (2 \cdot S_1 - 1) \cdot S_1 + v_J \cdot (2 \cdot S_2 - 1) \cdot S_2 + v_K \cdot (2 \cdot S_3 - 1) \cdot S_3 + v_L \cdot (2 \cdot S_4 - 1) \cdot S_4 + 4 \cdot \left(v_M \cdot S_1 \cdot S_2 + v_N \cdot S_2 \cdot S_3 + v_O \cdot S_1 \cdot S_3 + v_P \cdot S_1 \cdot S_4 + v_Q \cdot S_2 \cdot S_4 + v_R \cdot S_3 \cdot S_4\right) \quad (2.35)$$

Analogamente para w (equação (2.36)) (49).

$$w = w_I \cdot (2 \cdot S_1 - 1) \cdot S_1 + w_J \cdot (2 \cdot S_2 - 1) \cdot S_2 + w_K \cdot (2 \cdot S_3 - 1) \cdot S_3 + w_L \cdot (2 \cdot S_4 - 1) \cdot S_4 + 4 \cdot \left(w_M \cdot S_1 \cdot S_2 + w_N \cdot S_2 \cdot S_3 + w_O \cdot S_1 \cdot S_3 + w_P \cdot S_1 \cdot S_4 + w_Q \cdot S_2 \cdot S_4 + w_R \cdot S_3 \cdot S_4\right) \quad (2.36)$$

Possui capacidades de plasticidade, incluindo o “*Multilinear Isotropic Hardening*”, utilizado na descrição do material obtido experimentalmente (e utilizado na análise numérica), nomeadamente para este trabalho, grande capacidade deflexão e deformação, entre outras capacidades (16).

2.3 Revisão

A fundamentação teórica é uma componente essencial no entendimento de todas as variáveis envolvidas neste estudo, de modo a saber como as tratar e como estas se comportam por forma a atingir os resultados pretendidos.

Após a apresentação de toda a fundamentação teórica que sustenta este trabalho, são apresentados nos capítulos as características do material em estudo, e a validação do programa de elementos finitos para análises de comportamento plástico. Por fim são executadas análises numéricas/simulação aos elementos de ligação em estudo, prumos e espaçador, comparando por fim a análise do espaçador ao ensaio experimental efectuado.

3 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UM SISTEMA COM COMPORTAMENTO PLÁSTICO

Este trabalho aborda estudo do comportamento plástico de estruturas sujeitas a diferentes cargas. Para auxiliar esse estudo, recorre-se ao uso de um programa de elementos finitos capaz de executar estudos não-lineares com plasticidade. O primeiro passo para a execução do estudo prende-se com a descrição e introdução das características do material no programa, para um correcto estudo da estrutura. Em segundo lugar está validação desse mesmo programa de elementos finitos. A reprodução numérica de um exercício resolvido analiticamente que aborde estude o domínio plástico é então essencial para essa mesma validação.

Neste capítulo será inicialmente descrito o material com o qual se efectua a simulação do comportamento dos prumos e espaçador presentes adiante neste trabalho. Em seguida é efectuada a validação do programa de elementos finitos, o *ANSYS*, na sua vertente *Workbench*.

3.1 Descrição do material

De modo a ser possível obter uma curva correspondente ao comportamento do material em estudo decide-se executar um ensaio de tracção a provetes provenientes de uma peça real.

Os ensaios são executados na máquina de ensaio de tracção “Instron 8874”, figura 3.1 disponível no laboratório de ensaio de materiais (L.E.M.) do Departamento da Engenharia Mecânica (D.E.M.) da Universidade do Minho.

Figura 3.1 – Equipamento de realização de ensaios de tracção.

Para tal é utilizado um espaçador semelhante ao da figura 3.2. Do plano superior do mesmo, é retirada uma amostra de chapa rectilínea, para a execução de três provetes. Contudo, uma das áreas onde se dá a amarração dos provetes foi retirada da secção correspondente após a dobragem, visto que a deformação a nível microscópico do provete nessa área não introduz erros ao ensaio de tracção.

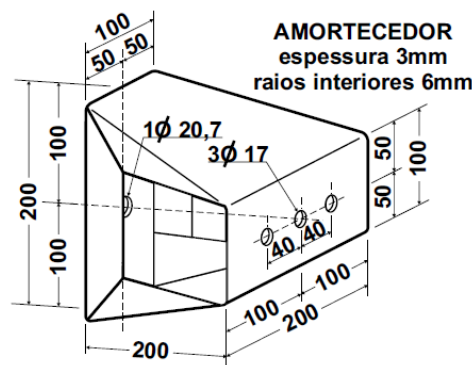



Figura 3.2 – Dimensões do espaçador (25).

Os provetes são maquinados através de um molde com as dimensões respeitando a norma EN 10002, para largura do provete de 20 mm apresentado anteriormente na tabela 1.7. Aquando do uso do termo "largura do provete", adiante neste trabalho, este refere-se à distância de 20 mm presente na figura 3.3. Contudo o comprimento total do provete não

apresenta os 300 mm mas sim aproximadamente 215 mm, devido às limitações dimensionais do espaçador.

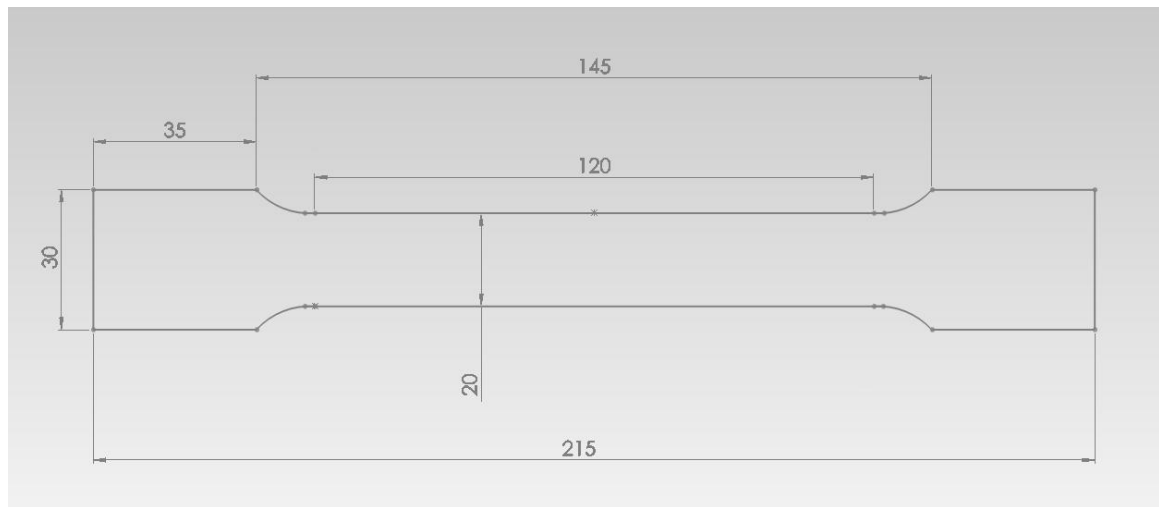



Figura 3.3 – Dimensões do provete.

O provete obtido apresenta uma espessura de sensivelmente 3 mm (mais propriamente 3,22 mm).

A máquina do ensaio tem a capacidade de exercer uma força máxima nominal de 25 kN.

O primeiro ensaio não é correctamente concluído. A espessura do provete é de 20 mm. A força máxima exercida pela máquina foi de sensivelmente de 26 560 N. Contudo, a força máxima aplicada ao provete não é suficiente para atingir a tensão de rotura do mesmo.

No segundo ensaio, o segundo provete é maquinado até atingir uma largura de 19 mm e ainda assim não é suficiente para a conclusão do ensaio com sucesso, repetindo-se o problema ocorrido no primeiro ensaio.

Para o terceiro ensaio, o terceiro provete é maquinado até atingir uma largura de sensivelmente 17,86 mm (valor medido no paquímetro). A força máxima exercida pela máquina é de 25 453 N, referente a uma tensão de rotura (curva de engenharia) de 442,58 MPa. A tensão de cedência registada para uma extensão de 0,2% é de 361,76 MPa. É possível obter o valor do módulo de *Young*, com um valor de sensivelmente 161 GPa, medido pelo extensómetro mecânico (figura 3.4) utilizado durante a deformação elástica do ensaio.

Figura 3.4 – Extensómetro mecânico utilizado.

O provete fractura após um alongamento total de 16,66 mm.

Sintetizando:

Módulo de *Young* (E) = 161 GPa;

Tensão de cedência (σ_c) para extensão de 0,2% = 361,76 MPa;

Tensão de rotura (σ_r) = 442,58 MPa;

Alongamento total (para l=215 mm) = 16,66 mm;

Alongamento total (para l_0=100 mm) = 15,56 mm.

O provete após fractura encontra-se presente na figura 3.5.

Figura 3.5 – Provete após fractura.

Contudo o l_0 considerado aquando a execução do teste foi de 100 mm, usualmente utilizado em ensaios onde não é importante verificar o comportamento plástico do material.

A fractura obtida, do tipo "taça-e-cone" refere precisamente a um material dúctil, com a figura 3.6 a representa os diferentes estágios deste tipo de fractura (10).

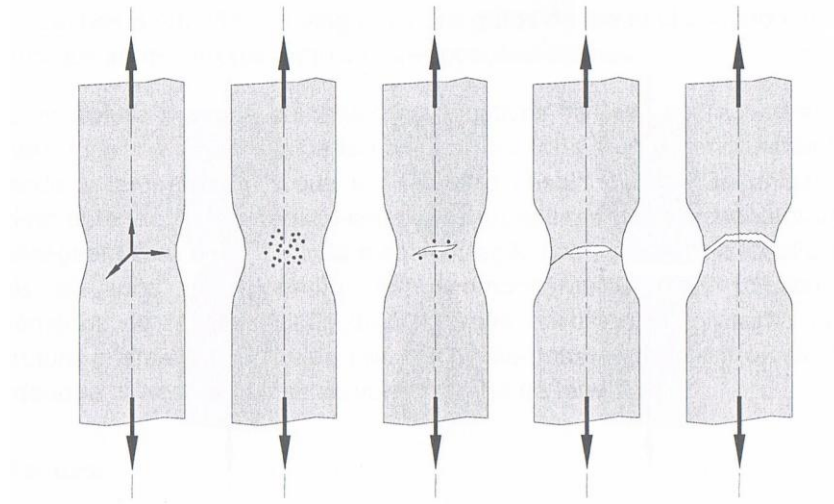



Figura 3.6 – Diferentes estágios de uma fractura dúctil do tipo "taça-e-cone" (10).

Assim sendo é necessário proceder a um ajustamento dos valores de alongamento, de modo a obter a extensão relativa a l_0. Da relação presente na equação (3.1), obtém-se um valor (R_{al}) pelo qual se multiplica os valores de alongamento apresentados na folha de cálculo.

$$R_{al} = \frac{15,56}{16,66} = 0,934 \quad (3.1)$$

Com o valor de R_{al} é possível relacionar os valores de alongamento extraídos da máquina, com os pretendidos para o l_0 de 100 mm, recorrendo à equação (2.2).

Através do valor do alongamento final, calcula-se a percentagem de deformação do provete. Para o l_0 de 100 mm o material tem uma deformação à fractura de 15,6%.

A figura 3.7 apresenta o gráfico da curva de engenharia obtida

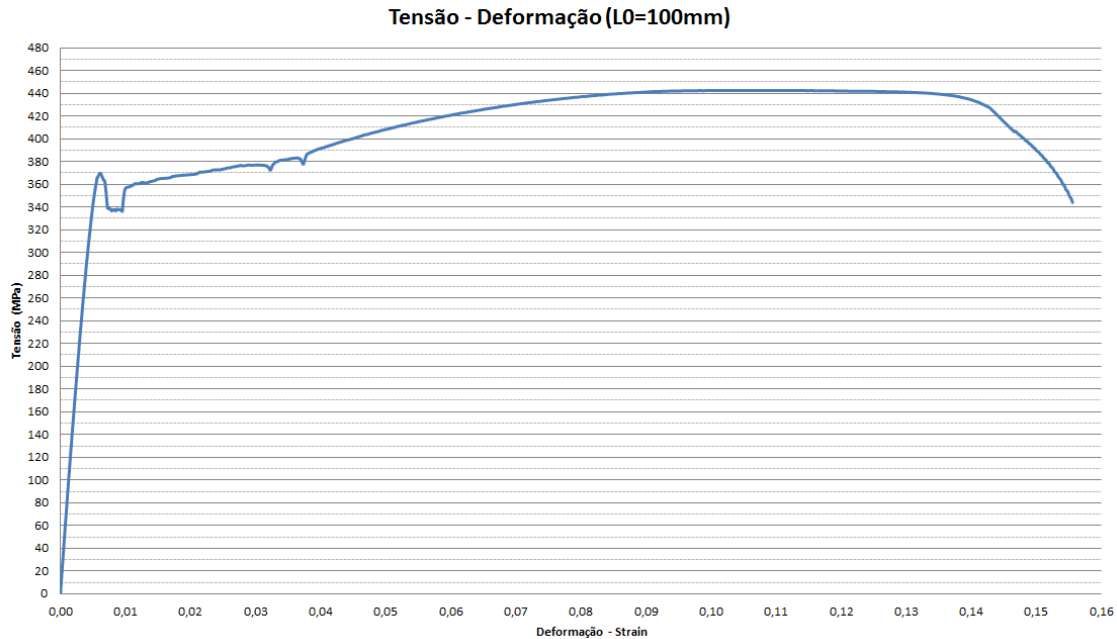



Figura 3.7 – Curva de engenharia para l_0.

A curva do domínio plástico é portanto a única que interessa neste estudo, visto que os valores relativos ao domínio elástico são inseridos directamente, nomeadamente o módulo de *Young* e o coeficiente de *Poisson*.

É então calculada a curva verdadeira do ensaio de tracção através das equações (2.7), (2.8), (2.9) e (2.10). Contudo a descrição da curva desde o ponto de força máxima (tensão de rotura da curva de engenharia), até ao ponto de fractura é feita apenas por esses mesmos dois pontos, visto não ter sido possível monitorizar a variação da instantânea da secção do provete ao longo do ensaio. Assim é possível obter uma curva tensão-extensão não totalmente descrita, mas aproximada (figura 3.8).

Por fim, são retirados os valores da extensão elástica aos valores totais de modo a obter apenas a extensão plástica, com valor inicial de zero para o ponto de tensão de cedência, como indica o programa. O declive da curva entre pontos também nunca pode ser inferior a zero, ou seja, o ponto seguinte tem de apresentar sempre uma tensão igual ou superior à anterior.

Não é possível calcular o valor do coeficiente de *Poisson*, pelo que é tomado o valor de 0,3, valor usual para o aço. O valor de massa volúmica de 7860 kg/m^3 também foi assumido sendo este material um aço.

Assim, é possível obter a curva de deformação plástica no programa, estando desta forma descrito o material (figura 3.8).

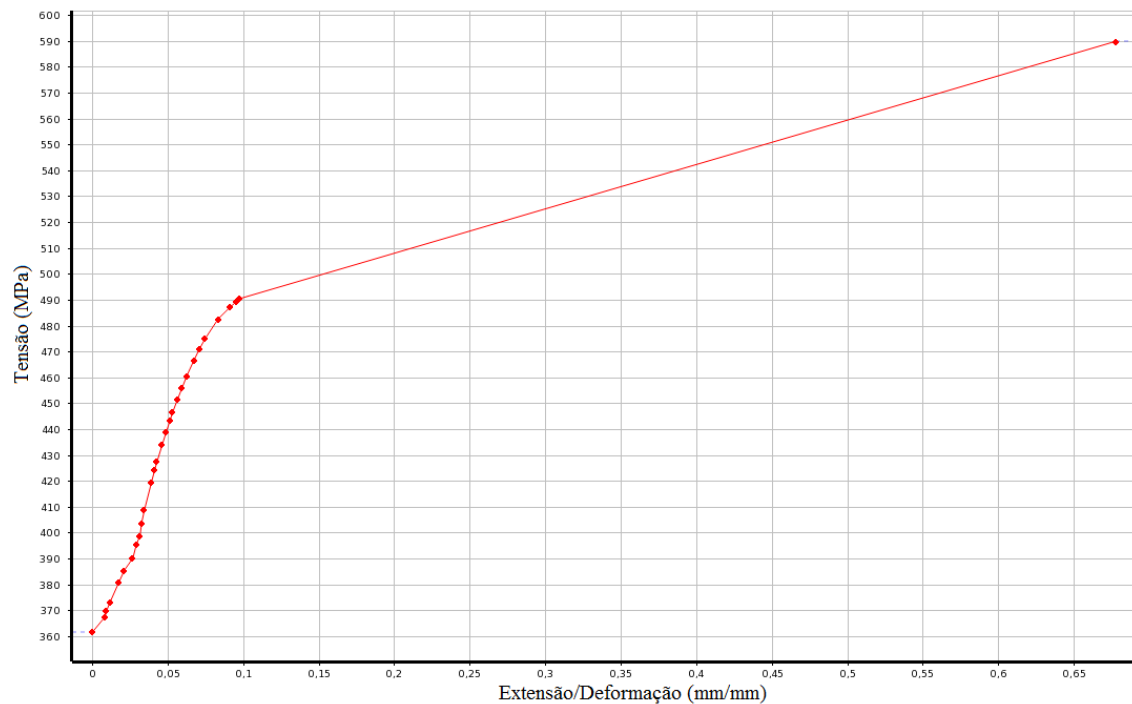



Figura 3.8 – Descrição do material no *ANSYS*.

O material é então descrito da seguinte forma, segundo a curva verdadeira:

Massa volúmica (ρ) = 7860 kg/m^3;

Módulo de *Young* (E) = 161 GPa;

Coeficiente de *Poisson* (υ) = 0,3;

Tensão de cedência (σ_c) para extensão de 0,2% = 361,76 MPa;

Tensão de rotura (σ_r) = 489,29 MPa;

Tensão a que se dá a fractura do material (σ_f) = 590,10 MPa;

Extensão à fractura (ε_f) = 0,68.

3.1.1 Composição do material

De modo a verificar o porquê de o material ensaiado ter um módulo de *Young* baixo para o que é espectável de um aço (sensivelmente 200 GPa) e uma tensão de cedência tão

elevada quando comparada com o os aços S235JR e S275JR com tensões de cedência de 235 e 275 MPa respectivamente, é executada uma análise química do material ensaiado.

O aço ensaiado laboratorialmente apresenta a composição química presente na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química do aço ensaiado laboratorialmente.

Elemento Químico	Carbono	Mangânes	Fósforo	Enxofre	Cromo	Silício	Ferro
Abreviatura	C	Mn	P	S	Cr	Si	Fe
Composição (%)	0,130	0,506	0,008	S < 0,010	0,012	0,174	99,200

Por sua vez, o aço S235JR apresenta a composição química presente na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química do aço S235JR em teores máximos (50).

Elemento Químico	Carbono	Mangânes	Fósforo	Enxofre	Azoto	Cobre
Abreviatura	C	Mn	P	S	N	Cu
Composição (%)	0,190	1,500	0,045	0,045	0,014	0,600

Por fim, o aço S275JR apresenta a composição química presente na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Composição química do aço S275JR em teores máximos (50).

Elemento Químico	Carbono	Mangânes	Fósforo	Enxofre	Azoto	Cobre
Abreviatura	C	Mn	P	S	N	Cu
Composição (%)	0,240	1,600	0,045	0,045	0,014	0,600

Por comparação entre os vários aços, verifica-se que o aço ensaiado laboratorialmente apresenta uma percentagem de carbono inferior à dos restantes, o que o torna mais dúctil. Ao ser mais dúctil, é compreensível que o módulo de *Young* seja inferior, embora não seja possível quantificar o quanto inferior deveria representar essa diferença do teor de carbono.

Verifica-se que o valor de percentagem de manganês é de sensivelmente 1/3 dos aços S235JR e S275JR. Este elemento químico contribui para o aumento da dureza do material.

Os restantes elementos passíveis de serem comparados, enxofre e azoto, verificam que grande discrepância percentil entre aço ensaiado laboratorialmente comparativamente aos aços S235JR e S275JR.

É possível assim afirmar que a composição química do aço ensaiado não é aproximada aos dos aços S235JR e S275JR como seria expectável.

Para além da composição química, foi também elaborada uma análise à galvanização presente no aço ensaiado, a qual verificou 91% de presença do elemento zinco. Uma galvanização à base de zinco portanto.

3.2 Análise numérica

O *ANSYS* é um programa bastante amplo de opções, permitindo a detalhada introdução das características do material.

É um programa que permite a execução de análises com comportamento não-linear, permitindo abordar assim o domínio plástico como se pretende.

Este programa é composto por dois principais interfaces, de linguagem de comandos e programação, o *Mechanical ANSYS Parametrical Design Language* (*A.P.D.L.*), e o de ambiente gráfico, o *ANSYS Workbench*. O interface escolhido para a realizar as análises foi o de ambiente gráfico (*Workbench*). Esta escolha justifica-se com o facto de ser mais intuitivo e fácil de trabalhar neste ambiente, desde a escolha de opções à configuração da análise. Citando Azevedo (11) "*Devido à grande complexidade associada ao desenvolvimento de modernos programas de computador dispondo de uma interface gráfica intuitiva, o desenvolvimento de software tem sido cada vez mais restringido às empresas especializadas. Por este motivo, o utilizador programador quase desapareceu, dando lugar ao mero utilizador.*"

Por predefinição no ambiente gráfico, todas as variáveis são controladas automaticamente, sendo apenas definidas pelo utilizador caso este o pretenda fazer. De tal modo é possível simplesmente construir uma peça, definir o material, o estudo que se

pretende fazer e correr a análise, que variáveis como a integração, *mesh* (malha), elementos, entre muitas outras opções são controladas automaticamente de acordo com as características da peça e análise executada. Estas definições automáticas estão sujeitas a erros, mas numa fase inicial da abordagem ao tema, como é esta, ajuda na eliminação de algumas variáveis com vista à mais rápida integração nas funcionalidades do programa.

3.2.1 Validação do programa

Assim sendo, pretende-se elaborar um estudo que seja considerado válido, com confiança nos resultados obtidos. Tendo em conta que o presente estudo entra no domínio da deformação plástica, a validação do programa de acordo com o tipo de estudo que se pretende efectuar adiante é obrigatória.

Para tal a primeira fase baseia-se na procura de um exemplo resolvido, ou passível de ser resolvido analiticamente, que seja possível representar no programa, comparando em seguida os resultados.

Tanto o modo de linguagem de comandos como o ambiente gráfico têm exemplos resolvidos disponíveis na "Ajuda". Estes estão contidos num manual de apoio ("*Verification Manual*"), um manual de exercícios resolvidos analítica e numericamente no *ANSYS*, no qual se compara os resultados obtidos em ambos.

Deste é escolhido o exemplo "WBVMMECH029" cujo título denomina-se: "*Elasto-plastic analysis of a rectangular beam*". Este exercício tem por base teoria presente na referência (51). Neste livro é possível verificar as equações necessárias ao cálculo da deformação de barras de diversos formatos.

Este exercício consiste numa barra de secção rectangular, cujas condições de fronteiras consiste num encastramento numa face, ou seja, uma face fixa, e um momento aplicado na face oposta, como é possível verificar na figura 3.9.

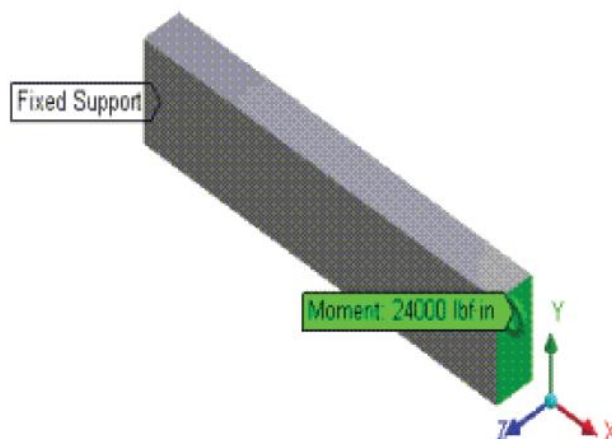



Figura 3.9 – Barra do exercício WBVMMECH029 fixa numa extremidade e momento aplicado na oposta (16).

A barra apresenta um comprimento de 254 mm e uma secção com largura (b) de 25,4 mm e altura (h) de 50,8 mm. Os momentos aplicados variam entre 24 000, 30 000 e 36 000 lbf.in.

O diagrama de corpo livre da barra é representado na figura 3.10. Fixa numa extremidade (encastrada) e com um momento aplicado na extremidade oposta

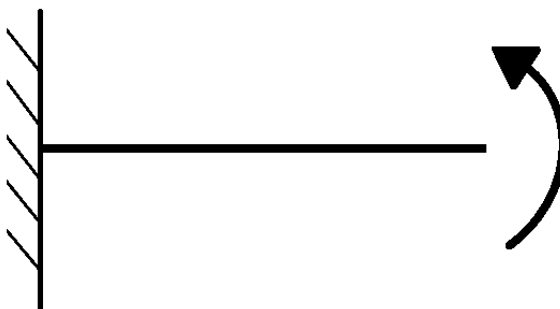



Figura 3.10 – Diagrama de corpo livre da barra do exercício WBVMMECH029.

A razão deste exercício prende-se o estudo do comportamento da barra sujeita a flexão pura, onde a as linhas longitudinais da barra são sujeitas a compressão e tracção, existindo uma linha longitudinal neutra à altura do centro de inércia da secção transversal (neste caso ao centro), onde não existe nenhum destes esforços. A face fixa funciona como um momento contrário ao aplicado na extremidade oposta.

Conforme o momento aplicado aumente, maior o esforço a que estão sujeitas as linhas longitudinais da barra. A barra entra em deformação plástica quando estas linhas longitudinais superiores e inferiores da secção atingem a tensão de cedência (figura 3.11 (1)). Este momento é denominado o momento de início de cedência (M_c). Com o aumento do momento aplicado, essa mesma tensão de cedência vai sendo atingida pelas linhas cada vez mais próximas da linha neutra. Quando o momento aplicado provoca entrada cedência da linha neutra, ocorre a plasticidade total (totalmente no domínio plástico) da secção da barra (figura 3.11 (3)), o denominado momento de plasticidade total (M_{lim}). A representação gráfica das várias fases de deformação da barra está presenta na figura 3.11.

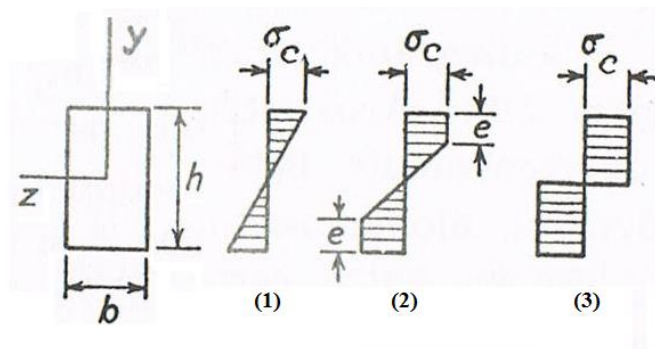



Figura 3.11 – Vários estágios de tensões presentes numa barra sujeita a flexão pura. Visto segundo a secção transversal. (51)

Os três diferentes valores de momentos aplicados à barra neste exercício, exercem sobre esta efeitos semelhantes aos presentes na figura 3.11 (1), (2) e (3) para M_c, 1,25 M_c e 1,5 M_c respectivamente.

A curva de tensão-extensão do material considerado para estes cálculos é bilinear e tem um declive de valor de zero para a linha correspondente ao domínio plástico (figura 3.12 b). A este tipo de material é dado o nome de material “elástico-perfeitamente-plástico”. Este exercício apresenta uma extremidade fixa e um momento na oposta (equivale a ter dois momentos contrários) como se pode verificar na figura 3.12 a. O problema inicial está definido em unidades inglesas e nesta representação, opta-se por manter este mesmo sistema de unidades (sistema imperial) de modo a evitar erros de arredondamento durante a resolução do exercício com vista a uma melhor comparação de resultados.

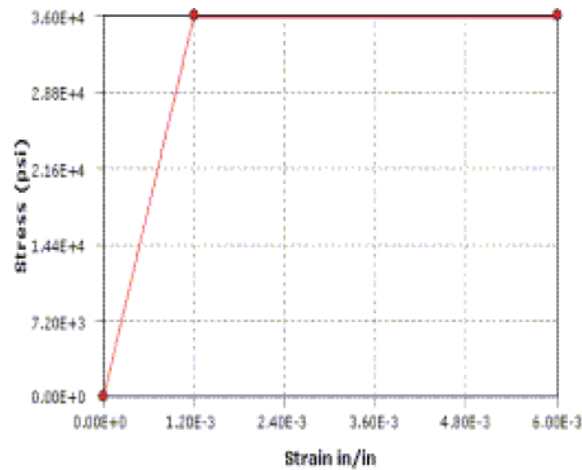



Figura 3.12 – Material elástico-perfeitamente plástico. Declive zero no domínio plástico (16).

Para a resolução deste exercício são fornecidos os seguintes parâmetros:

- Módulo de *Young*: $3x10^7$ psi ($2,07x10^5$ MPa)
- Coeficiente de *Poisson*: 0,0
- Tensão de cedência: 36 000 psi (248,21 MPa)
- Comprimento da barra (L): 10 polegadas (254 mm)
- Largura (b): 1 in (25,40 mm)
- Altura (h): 2 in (50,80 mm)
- Momentos a aplicar em diferentes análises:
    - 24 000 lbf.in ($2,71x10^3$ N.m);
    - 30 000 lbf.in ($3,39x10^3$ N.m);
    - 36 000 lbf.in ($4,07x10^3$ N.m).
- Elemento de malha com dimensão de 0,5 in (12,7 mm)

As equações retiradas do livro (51) que são necessárias à resolução do exercício "WBVMMECH029" são a equação (3.2) para o cálculo do momento de início de

cedência (M_c) do material da barra e a equação (3.3) para o cálculo do momento de plasticidade total da secção da barra (M_{lim}).

$$M_c = \sigma_c \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \tag{3.2}$$

O valor de M_{lim} é obtido através de M_c, considerando o valor “e” presente na figura 3.11 de “h/2” (51).

$$M_{lim} = \sigma_c \cdot \frac{b \cdot h^2}{4} \tag{3.3}$$

De acordo com a referência (51), o valor do momento que gera a total plastificação do material é 1,5 vezes superior ao momento que gera a cedência e inicia a deformação plástica do mesmo como é possível comprovar pela equação (3.4):

$$\text{Racio de momentos} = \frac{M_{lim}}{M_c} = \frac{\sigma_c \cdot \frac{b \cdot h^2}{4}}{\sigma_c \cdot \frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{6}{4} = \frac{3}{2} = 1{,}5 \tag{3.4}$$

Assim para este exercício verifica-se que para a tensão de cedência de 36 000 psi e para as dimensões da estrutura em análise acima referidas, M_c resulta em 24 000 lbf.in, precisamente o primeiro valor de momento fornecido no enunciado. Espera-se então que para este momento a deformação a viga rectangular já esteja submetida a tensões de 36 000 psi.

O segundo valor do momento presente no enunciado é de 30 000 lbf.in que representa um rácio de 1,25 vezes o valor de M_c, 24 000 lbf.in. Assim é possível verificar o resultado no programa para um material cujo declive da linha do domínio plástico é zero, ou seja, a tensão máxima deve-se manter nos 36 000 psi.

Por fim o terceiro valor de momento proposto é de 36 000 lbf.in que representa o valor para o qual se espera que o material atinja a plasticidade total, apresentando um rácio de 1,5 vezes o valor de M_c. Aqui, como o material entra em totalmente no domínio plástico, espera-se que o resultado no programa seja a não convergência da solução.

No fim do enunciado está presente uma tabela com os resultados analíticos para estes momentos, bem como os resultados numéricos esperados. Essa mesma tabela encontra-se representada na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Comparação de resultados do exercício WBVMMECH029.

Rácio M_c	Momento aplicado (lbf.in)	**Resultados (psi)**		Erro (%)
		Analítico	Numérico	
		Tensão Equivalente	Tensão Equivalente	
1	24 000	36 000	**36 059**	0,164
1,25	30 000	36 000	**36 288**	0,8
1,5	36 000	Não converge	**Não converge**	

No momento final, 36 000 lbf.in não se obtém resultado, o que corresponde numericamente a uma solução não convergente.

Assim o passo seguinte é o de reproduzir o mesmo exercício no programa de elementos finitos. Opta-se por uma descrição detalhada dos pormenores envolvidos na preparação do cálculo numérico porque a escolha das diferentes opções influenciam os resultados.

Inicialmente no ambiente gráfico do programa opta-se pelo módulo “*Engineering Data*” (Dados de engenharia), onde se introduzem as propriedades do material. Para que a análise seja feita de forma múltipla, com configurações semelhantes para todos os momentos, esta opção é introduzida singularmente (tal acontece com a componente “*Geometry*” (Geometria)), podendo ser transportada a sua configuração para várias análises, com vários momentos diferentes (figura 3.13).

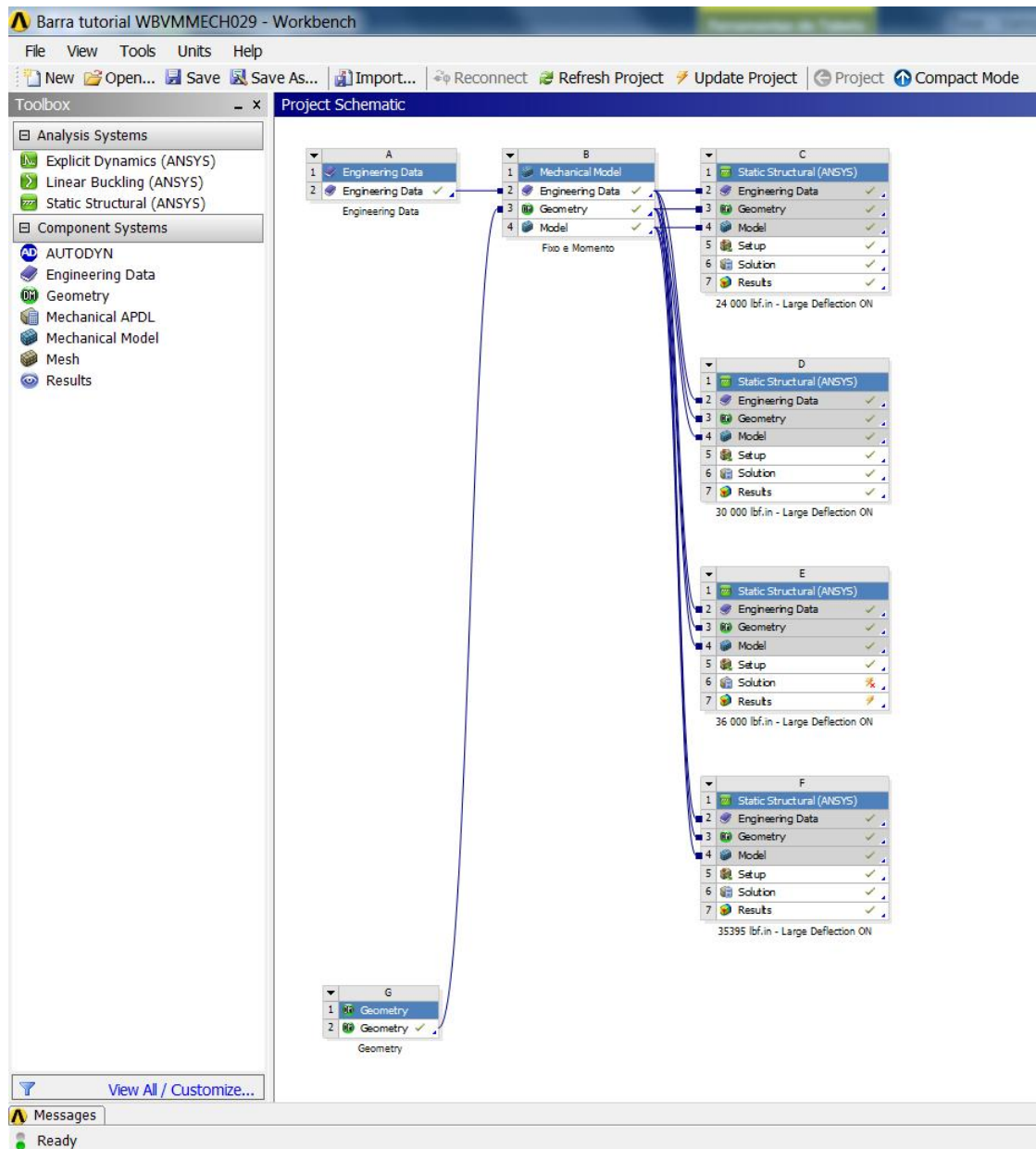



Figura 3.13 – Ambiente *Workbench* para a resolução do exercício WBVMMECH029.

Dentro do módulo “Dados de engenharia” são efectuadas as configurações presentes na figura 3.14 iguais às referidas no enunciado do exercício, nomeadamente, o módulo de *Young*, coeficiente de *Poisson*, tensão de cedência e curva de deformação plástica bilinear correspondente a um material elástico-perfeitamente plástico.

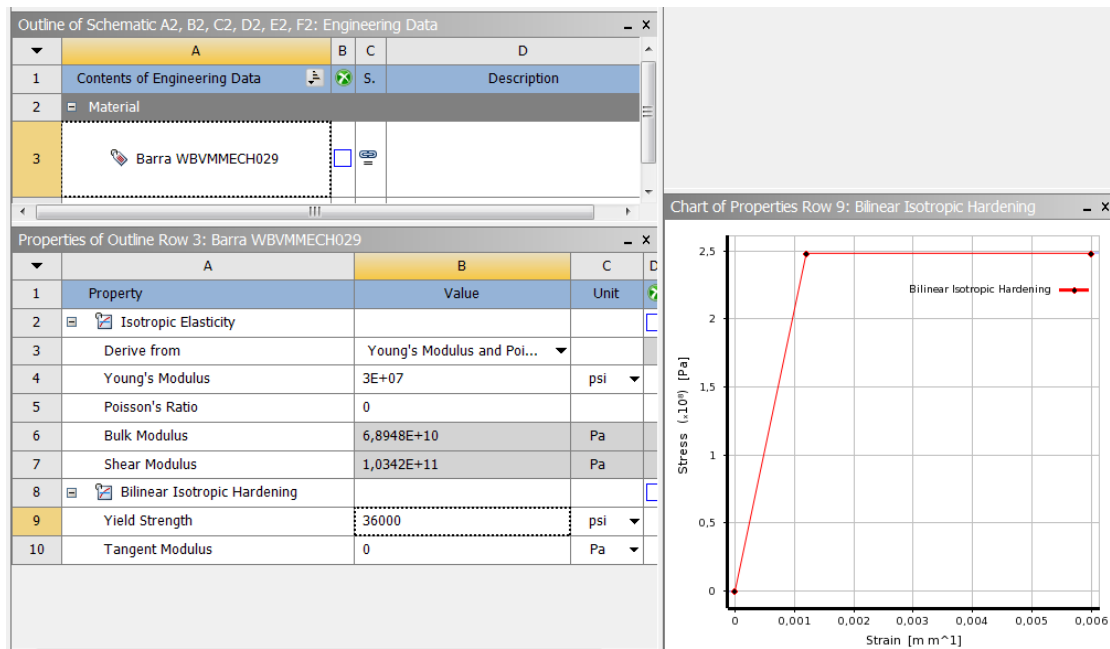



Figura 3.14 – Configuração do material “WBVMMECH029”.

Após a configuração do material procede-se ao desenho da barra na componente “Geometria” (figura 3.13) que abre o módulo “Design Modeler” (Modelador de Desenho).

Apesar de ser possível a importação de modelos a partir de programas de desenho, de modo a eliminar completamente a possibilidade de incompatibilidade em caso de resultados não esperados, e devido à simplicidade da mesma, opta-se por construir a viga rectangular no próprio programa *FEM*, dentro da componente “Geometria”.

O passo seguinte passa pela configuração de todo o problema, com a definição do material a utilizar, malha, forças a aplicar, tipo de resultado pretendido, entre outros. Todas estas opções são executadas dentro do módulo “*Mechanical*” (Mecânica).

A malha, tal como descrito no enunciado é constituída por elementos SOLID186 de 0,5 in, especificada através da opção “*Body Sizing*” (Dimensionamento dos elementos da malha) onde se pode especificar o tamanho dos elementos da malha. Esta malha apresenta um total de 1077 nós e 160 elementos (figura 3.15).

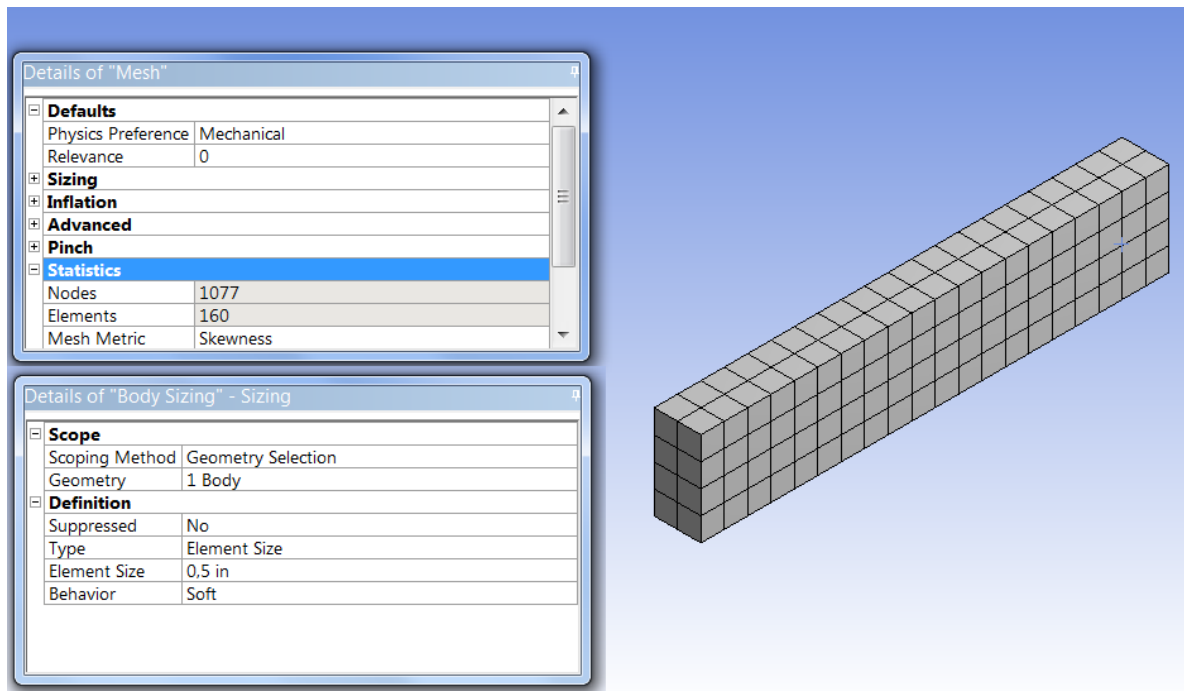



Figura 3.15 – Propriedades gerais da malha.

Visto que a análise se encontra no domínio plástico, e para que os resultados da deformação sejam mais próximas do componente real, a opção "*Large Deflection*" (Deflexão elevada) é activada para todos os diferentes momentos.

Define-se as condições de fronteira, com a face fixa, encastrada, "*Fixed Support"* (Suporte fixo), e a face onde é aplicada o momento, "*Moment*" (Momento), referindo as indicações descritas no enunciado (Figura 3.12 a).

Existem muitas opções presentes e possíveis de realizar em cada simulação. Algumas destas são definidas apenas de modo manual, como a "*Large Deflection*" que pode ser seleccionada "*On*" (Activada) ou "*Off*" (Desactivada), estando predefinida em "Off". Outras são definidas automaticamente de pelo programa ("*Program Controlled*"), de acordo com o tipo de estrutura e análise a executar, podendo ser alteradas manualmente (14).

O resultado que se pretende verificar é a "*Equivalent Stress*" (Tensão equivalente) na barra, tal como mencionado no enunciado do exercício.

3.2.2 Primeira fase de validação – Definição da malha

3.2.2.1 Primeira simulação

Após as definições gerais apresentadas em cima. Inicia-se a primeira fase de testes.

Foram corridas análises para o material WBVMMECH029 (figura 3.14) com a malha com 0,5 in de dimensão por elemento, com "Deflexão elevada" "Activa". Todas as restantes opções foram deixadas predefinidas.

Para tais definições são obtidos os resultados presentes na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Comparação de resultados da primeira simulação

Rácio M_c	Momento aplicado (lbf.in)	Resultados (psi)		Erro (%)
		Analítico	Numérico	
		Tensão Equivalente	Tensão Equivalente	
1	24 000	36 000	**38 878**	8
1,25	30 000	36 000	**36 000**	0
1,5	36 000	Não converge	**Não converge**	

Resultado de racio final	
Racio M_c atingido	Momento final (lbf.in)
1,25	**30 000**

Para finalizar, através de tentativa erro, procede-se ao cálculo do rácio de momentos, entre o momento de cedência e o momento que leva à plasticidade total do material é de sensivelmente 1,25, bastante longe dos 1,5 indicados pela referência (51).

Comparando com a tabela 3.4 verifica-se um erro para M_c, 24 000 lbf.in, de 8%, elevado quando comparado com os 0,164% expectáveis. O erro para 1,25 M_c, 30 000 lbf.in é contudo inferior, correspondendo exactamente à teoria, 0% de erro.

Assim é possível concluir que embora exista um erro de 8% para 24 000 lbf.in o problema principal deve-se ao rácio de momentos, que está bem abaixo do indicado pela bibliografia. As definições base não são portanto aceitáveis.

Tal solução não é aceitável. Não é possível validar o programa através desta simulação.

3.2.2.2 Segunda simulação

Após esta primeira simulação, opta-se por variar apenas a malha, aumentando a sua definição. Assim opta-se por refinar a malha para "*Medium*" (Médio). Desta forma, os nós passaram a ser 6761 e os elementos 1280.

Com estas novas definições procede-se a uma nova simulação numérica, dando origem aos resultados presentes na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Comparação de resultados da segunda simulação

Rácio M_c	Momento aplicado (lbf.in)	**Resultados (psi)**		Erro (%)
		Analítico	Numérico	
		Tensão Equivalente	Tensão Equivalente	
1	24 000	36 000	**36 538**	1,5
1,25	30 000	36 000	**Não converge**	
1,5	36 000	Não converge	**Não converge**	

Resultado de racio final	
Racio M_c atingido	Momento final (lbf.in)
1,17	**28 050**

Como é possível verificar pelos resultados, a refinação da malha diminuía a percentagem de erro do momento 24 000 lbf.in para 1,5%. Contudo esta diminui também o rácio de momentos para 1,17, até porque a cedência continua a ocorrer por volta dos 24 000 lbf.in (como seria expectável), ou seja, a refinação da malha não é a solução para a aproximação à solução do exercício. Daí a indicação no enunciado para a utilização de elementos de dimensões de 0,5 in.

Desta forma opta-se por verificar outras configurações, visto que o problema não está na malha.

3.2.3 Segunda fase de validação – Definição dos elementos

Após as variações de malha, e segundo a referência (14), tornam-se manuais as opções que estão controladas automaticamente pelo programa sendo possível verificar que alterações ocorrem na solução. A referência (15) apresenta também outras opções, nomeadamente a do método de criação de malha, onde é possível escolher o tipo de elementos, em vez do controlo automático do programa (figura 3.16).

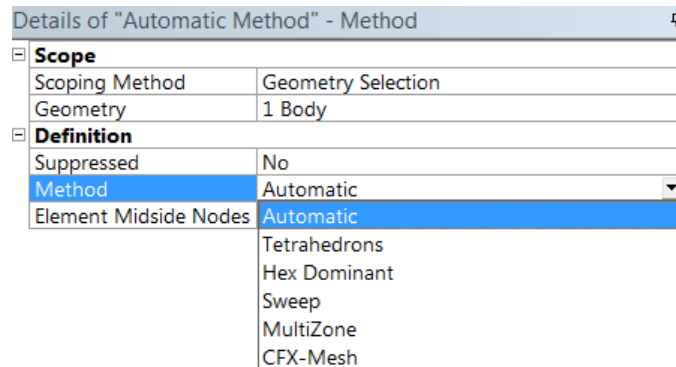



Figura 3.16 – Definição manual do método de criação de malha.

O programa está a utilizar automaticamente hexaedros, como é possível verificar na figura 3.15, mas também é possível adoptar outras opções como as presentes na figura 3.16 e figura 3.17, utilizando o controlo manual. Na figura 3.18 e figura 3.19 estão presentes as opções que introduzem realmente diferenças que vão de encontro com os resultados pretendidos.

Details of "Mesh"
Defaults
Physics Preference | Mechanical
Relevance | 0
Advanced
Relevance Center | Coarse
Element Size | Default
Shape Checking | Aggressive Mechanical
Solid Element Midside Nodes | Standard Mechanical
Straight Sided Elements | Aggressive Mechanical
Electromagnetics
Initial Size Seed | CFD
Smoothing | Explicit
Transition | Fast
Statistics

a)

Details of "Mesh"
Defaults
Physics Preference | Mechanical
Relevance | 0
Sizing
Inflation
Advanced
Shape Checking | Standard Mechanical
Element Midside Nodes | Dropped
Straight Sided Elements | Program Controlled
Number of Retries | Dropped
Kept
Rigid Body Behavior | Dimensionally Reduced
Mesh Morphing | Disabled
Pinch
Statistics

b)

Details of "Analysis Settings"
Step Controls
Number Of Steps | 1.
Current Step Number | 1.
Step End Time | 1. s
Auto Time Stepping | On
Define By | Substeps
Initial Substeps | 10.
Minimum Substeps | 5.
Maximum Substeps | 100.
Solver Controls
Nonlinear Controls
Output Controls
Analysis Data Management
Visibility

c)

Details of "Analysis Settings"
Step Controls
Solver Controls
Solver Type | Program Controlled
Weak Springs | Program Controlled
Direct
Large Deflection | Iterative
Inertia Relief | Off
Nonlinear Controls
Output Controls
Analysis Data Management
Visibility

d)

Details of "Analysis Settings"
Step Controls
Solver Controls
Solver Type | Program Controlled
Weak Springs | Program Controlled
Large Deflection | On
Inertia Relief | Off
Nonlinear Controls
Force Convergence | Program Controlled
Moment Convergence | Program Controlled
Displacement Conv… | Program Controlled
Rotation Converge… | Program Controlled
Line Search | Program Controlled
Output Controls

e)

Figura 3.17 – Algumas das várias opções passiveis de serem alteradas da sua predefinição (14).

A opção presente na figura 3.18 é tomada sem tornar manual, qualquer outra das opções controladas automaticamente pelo programa. Encontra-se no menu "Geometria" dentro do submenu "*Definition*" (Definição). Na caixa "*Element Control*" (Controle de elementos), opta-se pela opção "Manual" (figura 3.18).

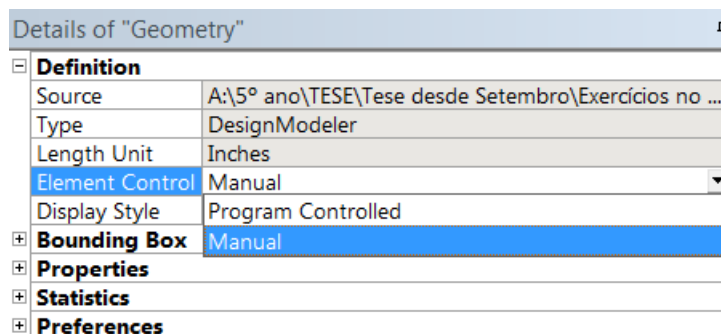



Figura 3.18 – Caixa "*Element Control*" no menu *Geometry*.

Ao activar esta opção (figura 3.18), dentro da janela "Geometria" dá origem a uma opção extra no menu "*Solid*" (Sólido). No submenu "Definição" gera uma caixa "*Brick*

Integration Scheme" (Esquema de integração dos elementos), onde se pode optar pela opção "*Full*" (Total) ou "*Reduced*" (Reduzida) (figura 3.19).

O que esta opção permite é a melhor definição do elemento. Tendo em conta a base fornecida pelos fundamentos teóricos, esta opção aumenta o número de pontos onde é executa a análise de tensões e extensões. Segue o mesmo formato de cálculo, contudo, a definição do elemento é maior, pois apresenta uma maior densidade de pontos onde são efectuados cálculos.

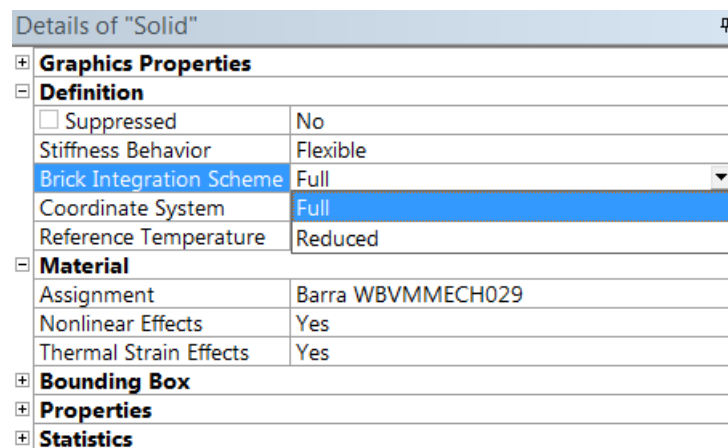



Figura 3.19 – Caixa "*Brick Intregration Scheme*" no menu Solid.

São executados testes que verificam que ao optar-se pela opção "Reduzida" os resultados obtidos são semelhantes aos obtidos na primeira simulação, apresentados na tabela 3.5, ou seja, o programa escolhia automaticamente a opção "Reduzida" para este caso.

3.2.3.1 Terceira simulação

Desta forma opta-se a opção manual "Total" (*Full*) (figura 3.19), por forma a verificar se os resultados se aproximam aos esperados.

Com esta opção e mantendo a configuração da primeira simulação são obtidos os seguintes resultados presentes na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Comparação de resultados da terceira simulação

Rácio M_c	Momento aplicado (lbf.in)	Resultados (psi)		Erro (%)
		Analítico	Numérico	
		Tensão Equivalente	Tensão Equivalente	
1	24 000	36 000	**36 067**	0,2
1,25	30 000	36 000	**36 650**	1,8
1,5	36 000	Não converge	**Não converge**	

Resultado de racio final	
Racio M_c atingido	Momento final (lbf.in)
1,33	32 000

Em comparação com a tabela 3.4 verifica-se um erro para M_c, 24 000 lbf.in, de 0,2%, é quase igual aos 0,164% expectáveis. O erro para 1,25 M_c é agora de 1,8%, não muito afastado dos 0,8% expectáveis.

O valor do rácio de momentos por sua vez aumenta, para 1,33.

Embora os resultados não sejam ainda perfeitos, tendo em conta o erro para o momento de 30 000 lbf.in (1,25 M_c) e o rácio de momentos que se mantém bem abaixo dos 1,5 expectáveis, estes mesmos resultados (tabela 3.7) indicam que este é o caminho a seguir de modo a atingir resultados mais concordantes.

Assim, voltam-se a executar combinações, com algumas opções presentes na figura 3.17, contudo, sem sucesso, o rácio de momentos não aumenta pela alteração destas opções.

3.2.3.2 Quarta simulação

Desta forma, e após uma verificação mais minuciosa da “Ajuda” do programa bem como da referência (14), é possível verificar que a questão poderia não ser das opções tomadas na análise, mas sim de problemas geométricos.

De acordo com exercícios presentes na referência (14) e (52) verifica-se que geometrias com arestas vivas, em que estas estão em contacto vivo com outra superfície, ou em que a deformação ocorre especialmente nessa área, pode levar ao surgimento de

um problema localizado de exagerada deformação que causa resultados erráticos ou até uma não solução. A referência (52) denomina tal problema de singularidades, ou seja acontecimentos não frequentes mas possíveis, e sugere para sua resolução a introdução de pequenos raios de curvatura.

Verifique-se o exemplo presente na figura 3.20.

a) b)

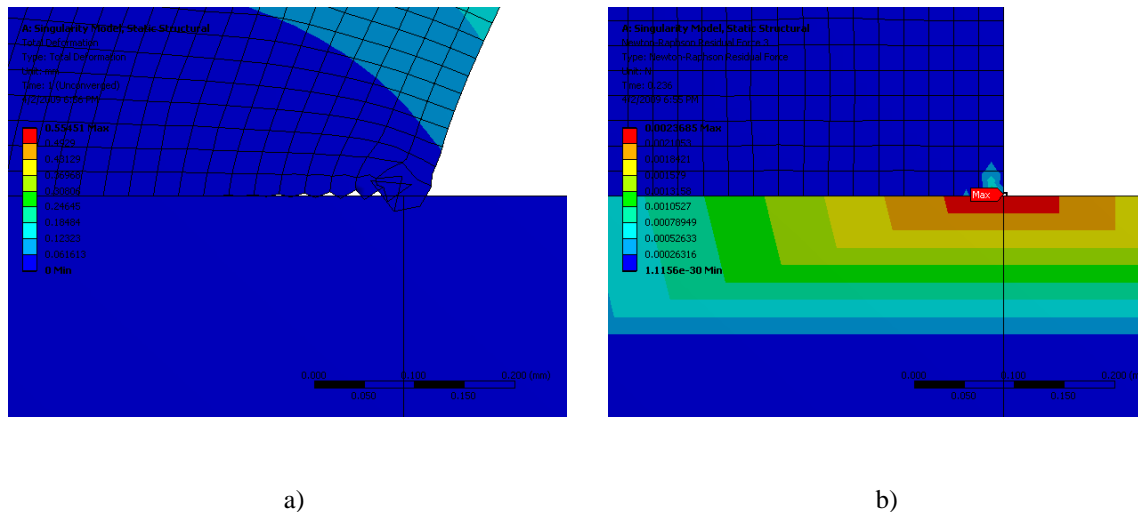



Figura 3.20 – Ilustrações de contacto com aresta viva entre superfícies (52).

a) Deformação com comportamento defeituoso.

b) Concentração de tensões.

Após a inserção de um raio de curvatura (figura 3.21) no local da aresta viva (figura 3.20), verifica-se um comportamento esperado da estrutura (figura 3.21).

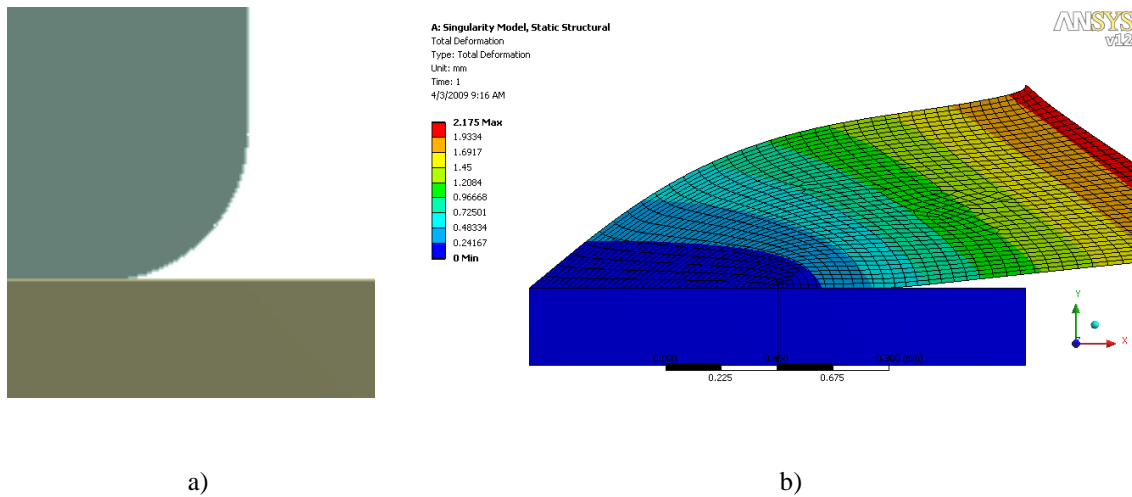



Figura 3.21 – Ilustrações de contacto com raio de curvatura entre superfícies (52).

a) Visualização do raio de curvatura.

b) Deformação total da peça.

Na barra em estudo o momento é aplicado da forma presente na figura 3.22.

Figura 3.22 – Aplicação do momento na barra (verificar a posição dos eixos).

Ao verificar o comportamento da barra perante a aplicação do momento, verifica-se que a tensão equivalente máxima dá-se na zona superior da face, perto da aresta, onde é aplicada o momento na figura 3.23.

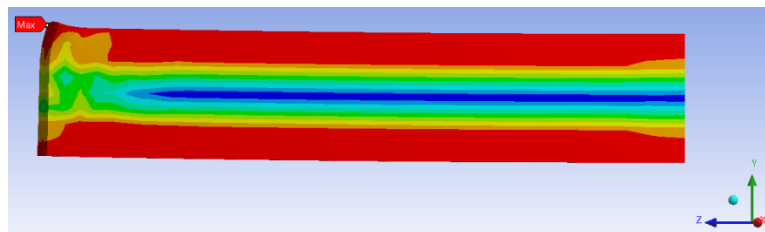



Figura 3.23 – Tensão equivalente para 32 000 lbf.in na terceira simulação.

Como é possível verificar através da introdução da solução "Deformação total" a deformação máxima (figura 3.24) dá-se também no mesmo local da tensão máxima presente na figura 3.23.

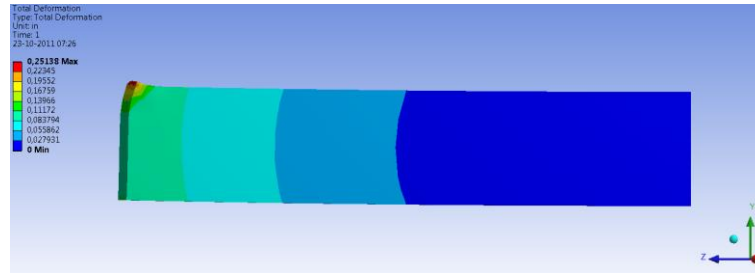



Figura 3.24 – Deformação total para 32 000 lbf.in na terceira simulação.

De forma a verificar se o problema se prende realmente com este facto, é efectuado um “*blend*” (suavização de arestas) em todas as arestas da face onde é aplicado o momento. Com este é possível substituir a aresta viva por uma com um ligeiro raio de curvatura.

É inserido um pequeno raio de curvatura, de modo a não criar grande transformação na forma da barra. O raio de curvatura introduzido é de 0,025 in (0,635 mm). Essa alteração geométrica pode ser identificada na figura 3.25.

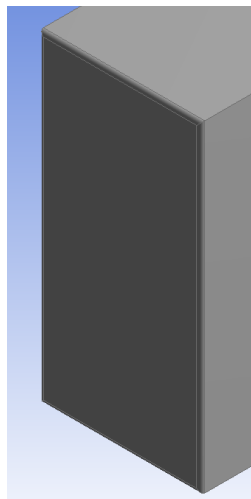



Figura 3.25 – Face com após a inserção do raio de curvatura.

Após esta alteração são reiniciados os testes.

A nova simulação utiliza a mesma configuração presente na terceira simulação, apresentando apenas a alteração geométrica mencionada anteriormente e presente na figura 3.25.

A malha aplicada é a mesma sugerida no enunciado, elementos com 0,5 in de dimensão, contudo, devido à alteração geométrica, esta passa a apresentar 1233 nós e 184 elementos (figura 3.26).

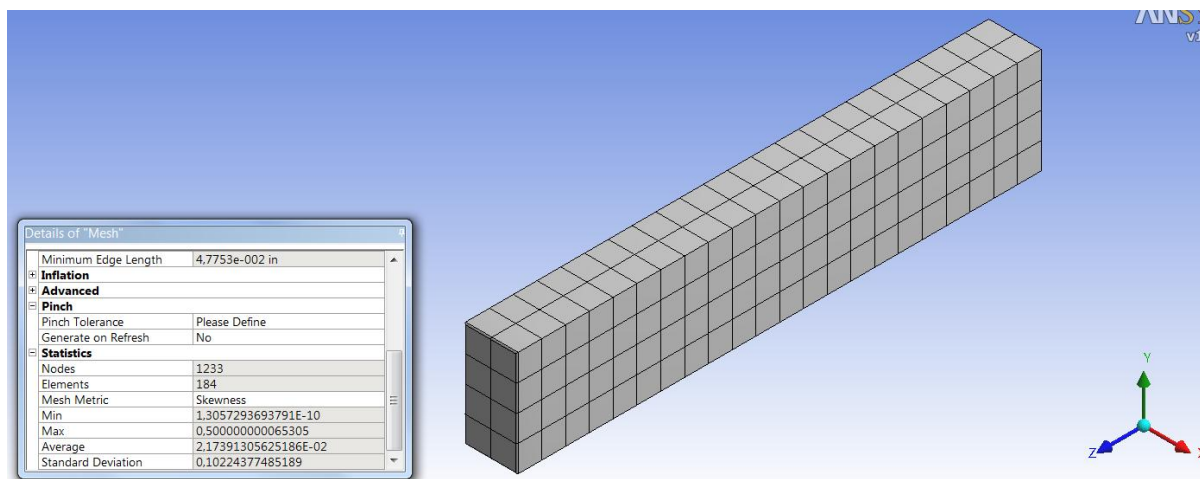



Figura 3.26 – Detalhes da malha da quarta simulação

Os resultados obtidos estão presentes na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Comparação de resultados da quarta simulação

Rácio M_c	Momento aplicado (lbf.in)	Resultados (psi)		Erro (%)
		Analítico	Numérico	
		Tensão Equivalente	Tensão Equivalente	
1	24 000	36 000	**36 069**	0,2
1,25	30 000	36 000	**36 000**	0
1,5	36 000	Não converge	**Não converge**	

Resultado de racio final	
Racio M_c atingido	Momento final (lbf.in)
1,47	35 395

Verifica-se um erro de 0,2% para o momento de 24 000 lbf.in. Para o momento de 30 000 lbf.in não verifica erro, e como seria de esperar, a solução não converge para o momento de 36 000 lbf.in.

Para finalizar o rácio de momentos foi de 1,47, tendo o último momento antes da não convergência atingindo o valor de 35 395 lbf.in, marcando a diferença perante as simulações efectuadas anteriormente. Para um rácio de momentos de 1,48 já não existe convergência, distanciando-se da teoria presente na referência (51) por 2 centésimas. O valor do último momento convergente é aproximado, sendo obtido através de tentativa-erro. Para um momento de 35 400 lbf.in, segundo as mesmas configurações, já não existe convergência de solução.

3.2.4 Discussão da validação

Posteriormente é efectuada uma nova simulação, com o raio de curvatura presente na figura 3.25 mas com a opção “Reduzida” (*Reduced*) presenta na figura 3.19. Tal situação verifica uma não convergência para qualquer um dos momentos aplicados, assim como para o caso de deixar a opção de “Controlo de elementos” (*Element Control*) (figura 3.18) controlada automaticamente pelo programa. A integração reduzida entra em conflito com o raio de curvatura introduzido, presente na figura 3.25. Com isto é possível afirmar que nem todas as opções tomadas automaticamente são as mais correctas, por vezes é nítida a necessidade de tomar decisões manualmente.

Como foi possível verificar para este caso específico, a alteração geométrica é importante, contudo é essencial que em conjunto com esta, as opções “Controlo de elementos” seja definida como “Manual” e a opção “Esquema de integração dos elementos” como “Total”. Esta opção pode levar ao aumento do tempo de realização de simulações (14). Contudo, garante sempre um resultado capaz de obter melhores resultados visto que cada elemento tem mais pontos de integração/definição do elemento para o cálculo de tensões e extensões, justificando uma melhor reprodução do comportamento da estrutura, ainda que o resultado final possa não conter alterações (14). Neste exemplo, o elemento utilizado foi o SOLID186 apresentado nos fundamentos teóricos, que numa opção “Total” é constituído por 14 pontos, e numa opção “Reduzida” por 8 pontos de análise, como é passível de verificar na fundamentação teórica.

Desta forma é efectuada uma comparação de tempo entre três simulações apresentadas anteriormente, a primeira, terceira e a quarta, para os 3 diferentes momentos.

A análise é efectuada com as mesmas definições de performance do computador para todas as três simulações. São registados os seguintes tempos:

- A primeira simulação (definições base) regista um tempo de aproximadamente 59 segundos.

- A terceira simulação ("Esquema de integração dos elementos" como "Total") regista um tempo de aproximadamente 1 minuto e 6 segundos.

- A quarta simulação ("Esquema de integração dos elementos" como "Total" e geometria alterada com a introdução do raio de curvatura) regista um tempo de aproximadamente 1 minuto e 23 segundos.

Entre a primeira e a terceira simulação é possível obter a melhor perspectiva da influência da opção "Esquema de integração dos elementos" como "Total" apenas, com um aumento de tempo de execução na ordem dos 10%.

A quarta simulação permite a validação do programa com o accionamento da opção "Controlo de elementos" como "Manual" e de seguida a opção "Esquema de integração dos elementos" como "Total". O aumento de 10% relativo ao tempo de execução, para estruturas semelhantes é comportável e as diversas simulações executadas verificam que a activação desta opção não introduz desvantagens na análise em relação aos resultados expectáveis teoricamente. A referência (14) afirma contudo que traz vantagens nomeadamente em casos onde a estrutura não tem pelo menos duas camadas de elementos em cada direcção. As desvantagens referentes à sua utilização estão presentes em casos de estudo de materiais com coeficiente de *Poisson* próximo ou igual a 0,5 (14), o que também não acontece neste trabalho.

O conteúdo presente nesta validação contém descrição de várias opções a tomar, que vão de encontro a um manual de utilização. Esta descrição foi simplificada, mantendo-se ainda assim muito pormenorizada. Contudo, visto que a validação do programa de elementos finitos é um ponto muito importante para a confiança nos resultados através dele obtidos, e para com isso poder avançar neste trabalho, tal descrição pormenorizada foi tida como necessária.

Para uma descrição mais pormenorizada, o Anexo D apresenta um breve manual de utilização do *ANSYS*.

4 APLICAÇÃO AO CASO REAL

Como já foi referido, o presente trabalho encontra-se enquadrado num projecto de estudo do comportamento de barreiras de protecção rodoviária. Contudo tem como intuito estudar apenas o comportamento das ligações, especificamente os elementos prumo e espaçador.

Para executar tal análise é preciso verificar primeiro duas situações. A norma, para perceber que tipo de acção se deverá aplicar, tendo em conta os parâmetros apresentados na tabela 1.5, e analisar alguns locais de acidentes que envolvam o embate com as barreiras de protecção para perceber o comportamento destes dois elementos em estudo.

A tabela 4.1 apresenta os valores de forças médias envolvidas em colisões consoante os níveis de contenção, abordados anteriormente, a deflexão da barreira de protecção rodoviária. Contudo, a norma (53) afirma que na ancoragem, a força pode chegar a valores de força 2,5 vezes superiores aos presentes na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Níveis de contenção (de todo o sistema), com energia cinética, forças e deflexão da barra (53).

Nível de Contenção	Energia Cinética kJ	Deflexão da Barreira de Protecção Rodoviária m					
		0,1	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
		Força Média (F) kN					
T1	6,2	16,8	9,3	5,8	4,2	3,3	2,7
T2	21,5	36,5	24,2	16,7	12,7	10,3	8,6
T3	36,6	46,7	33,8	24,7	19,4	16,0	13,6
N1	43,3	59,2	42,0	30,3	23,7	19,4	16,5
N2	81,9	112,0	79,4	57,2	44,7	36,7	31,1
H1	126,6	93,6	76,6	61,7	51,6	44,4	38,9
H2	287,5	133,0	116,8	100,4	88,1	78,5	70,8
H3	462,1	266,4	227,1	189,8	163,0	142,9	127,1
H4a	572,0	311,3	267,6	225,4	194,7	171,4	153,1
H4b	724,6	269,1	242,1	213,6	191,1	172,8	157,8

Estes valores são calculados através da seguinte equação (4.1) (53).

$$F = \frac{m \cdot (v \cdot \sin \alpha)^2}{2 \cdot [c \cdot \sin \alpha + b \cdot (\cos \alpha - 1) + S_b]} \tag{4.1}$$

Expressão obtida em função das condições de embate de um veículo como pode ser vista na figura 4.1.

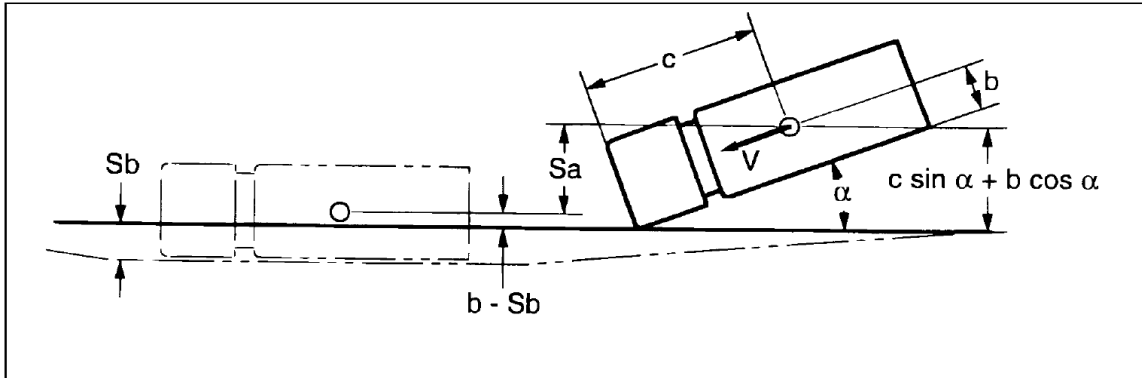



Figura 4.1 – Níveis de contenção, com energia cinética, forças e deflexão da barra (53).

Utilizando a equação (4.1) em ordem à velocidade (v) obtém-se a equação (4.2).

$$v = \frac{\left[\frac{F \cdot 2 \cdot [c \cdot \sin\alpha + b \cdot (\cos\alpha - 1) + S_b]}{m}\right]^{1/2}}{\sin\alpha} \qquad (4.2)$$

Como este estudo incide nas ligações das barreiras de protecção rodoviária, é executada a análise aos elementos prumo e espaçador, com o intuito de verificar como estes se comportam com a aplicação destas acções.

Os componentes são analisados separadamente de modo a verificar o seu comportamento individualmente à aplicação da força resultante do impacto. O objectivo é verificar o seu comportamento dentro de uma amplitude de forças que termina na não convergência de solução, por via da entrada do material (secção em estudo) em plasticidade total, de modo a construir um gráfico de comportamento retirando por fim a equação aproximada da curva de força, deslocamentos e tensões. Assim é possível identificar a velocidade de embate dado veículo através dos deslocamentos finais dos prumos, essencialmente para velocidades baixas, visto que o objectivo de funcionamento das barreiras prende-se com a dobragem do prumo, rotura da ligação com a barra longitudinal, deixando esta a funcionar como sistema de retenção através da transferência de forças entre as barras (figura 4.2).

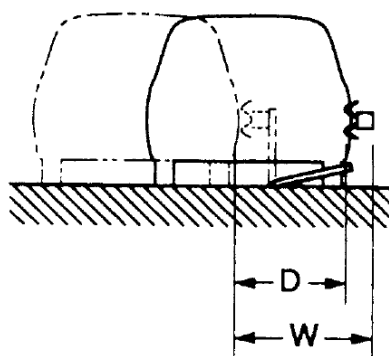



Figura 4.2 – Sistema de funcionamento das barreiras de protecção (33). Deflexão da barreira.

Relativamente aos elementos de ligação entre o solo e o espaçador, os prumos, são analisados os C125 e UPN120, para o mesmo material, de modo a ver qual tem o melhor comportamento. Quanto à ligação entre o prumo e a barra longitudinal, realizada pelo espaçador, é elaborado um estudo do seu comportamento para uma estrutura do tipo II (5), presente na figura 1.10, de modo a verificar o comportamento a nível de tensões e deslocamento à aplicação de força.

A simulação considera a área de contacto entre o espaçador e o prumo como a área aplicação da força, consequência de um despiste que colide com a barreira precisamente no local de fixação do prumo.

O objectivo final é retirar as suas curvas de comportamento, força-deslocamento horizontal (direcção e sentido de aplicação da força) máximo, força-deslocamento vertical máximo, e ainda tensão equivalente máxima-força (formulação de *von Mises*), obtendo também a equação aproximada ao comportamento das diversas curvas através de linhas de tendência. Assim obtém-se uma equação final da qual se poderá retirar o valor de força aplicada através dos deslocamentos máximos, e de tensões através da força aplicada. Com estes dados é possível verificar um local de embate, numa situação semelhante à simulada e obter o valor de velocidade de impacto. Através da medição do deslocamento será possível obter a força aplicada, e com a força aplicada é possível obter a velocidade de embate do veículo (se originar baixas deformações) através da inserção das medidas, massa, ângulo de embate do veículo e deflexão máxima, que deve ser no máximo a distância relativa à altura de fixação da barra longitudinal, 550 mm, para os prumos, e no máximo 200 mm (seu comprimento máximo) para o caso do espaçador. Para tal deve-se

recorrer à equação (4.1). Com as curvas tensão força é ainda possível verificar as tensões equivalentes máximas envolvidas.

De modo a identificar qual a força para a qual não existe convergência de solução é necessário efectuar vários testes, para diferentes forças, através de tentativa-erro. Isto acontece porque não pretendemos analisar o comportamento da estrutura perante determinada força específica, mas sim para uma vasta amplitude de forças.

Quanto a condições de fronteira, a simulação considera o prumo fixo, representando um encastramento total no solo, sem capacidade de deformação neste. Ou seja, dos 1700 mm do prumo, 1050 mm serão restringidos, e 650 mm são susceptíveis a deformação. Ainda no prumo é aplicada uma força na área corresponde ao contacto com o espaçador de tipo II. Para o espaçador, existe fixação na totalidade da face anterior, a zona de contacto com o prumo, e uma força aplicada na face oposta, onde se dá o contacto com a barra longitudinal.

Na realidade, pela visualização de locais de acidente (figura 4.3), o comportamento dos prumos não está de acordo com o encastramento ao solo, a menos que se tratem de barreiras do tipo obras de arte (Figura 1.4).

Figura 4.3 – Exemplo de local de acidente (3).

No caso das barreiras obras de arte a fixação é aparafusada a outra placa encastrada ao solo (figura 4.4), estas não apresentam deformação significativa.

Figura 4.4 – Prumo utilizado nas barreiras obras de arte (5).

O *LIER* utiliza sensores para medições nos testes experimentais, os quais se deformam e cujo encastramento é semelhante ao da barreira obra de arte, e como é possível verificar na figura 4.5, com este nível de encastramento não existe deformação na fixação ao solo, apenas no prumo.

Figura 4.5 – Sensores LIER (30).

Sem uma correcta fixação dos prumos não existe nenhuma força resistente ao impacto do veículo, dessa forma a barreira deforma-se em solidariedade com o solo (figura 4.3) e acaba por não existir o rompimento (ou acontece tardiamente) da ligação como se pretende (figura 4.2).

Durante a simulação são aplicadas diferentes forças até ao ponto de não convergência de solução, quando tal acontece é porque o material entra totalmente no domínio plástico. É necessário salientar que todas as análises numéricas efectuadas têm activa a opção "deflexão elevada"

4.1 Prumo C125

Este é o primeiro prumo a ser analisado, C125 (para dimensões, ver Anexo E). Na figura 4.6 é possível verificar as condições de fronteira aplicadas a este prumo, um encastramento (A) que representa a fixação do prumo abaixo da linha do solo e a força aplicada (B) correspondente à base de contacto com o espaçador. O cilindro, onde se encontra "A" é uma forma simplificada de representação do encastramento do prumo ao solo e estende-se por 1050 mm dos 1700 mm de comprimento total do prumo. A força está aplicada "B" apenas a uma área de 200 mm de altura correspondente à altura da face do espaçador em contacto com o prumo.

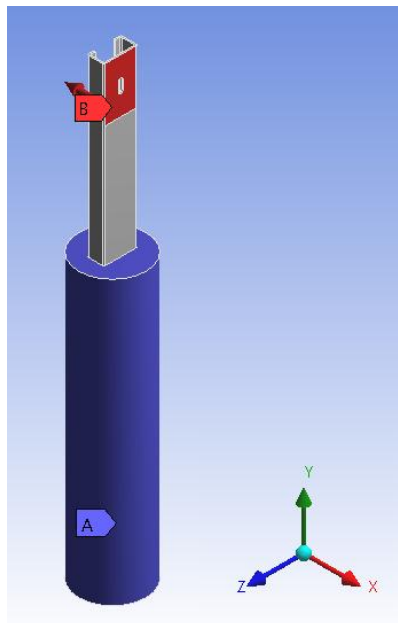



Figura 4.6 – Prumo C125 – Restrições, aplicação de força e sistema de eixos.

A força "B" é aplicada na perpendicular à face seleccionada (direcção do eixo dos xx) como é possível verificar na figura 4.7.

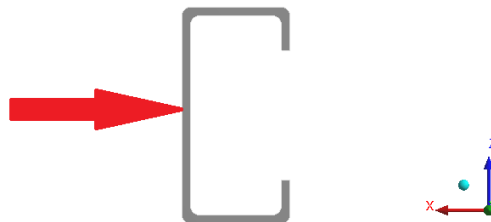



Figura 4.7 – Força aplicada no prumo C125. Vista de topo.

O estudo feito por simulação numérica para diferentes valores de força está presente na figura 4.11 que apresenta a curva de relação tensão equivalente máxima-força.

É utilizada malha grosseira, pois demonstra um correcto comportamento, podendo depois limitar os resultados a uma amplitude de forças menor. Com malha mais fina a deformação é menor, levando a uma menor capacidade de análise, para além do facto dos erros relacionados ao aumento da definição de malha aquando da validação do programa com o exercício “WBVMMECH029”. Esta malha é então constituída por 3018 elementos SOLID187, apresentando a seguinte definição (figura 4.8).

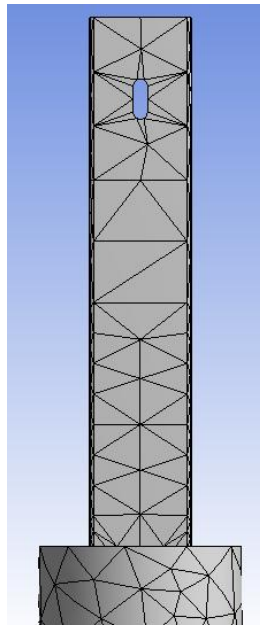



Figura 4.8 – Prumo C125 – Definição da malha grosseira.

Verifica-se por tentativa-erro, que a última força aplicada para a qual existe convergência acontece a sensivelmente F=178 500 N.

Em seguida, na figura 4.9 são apresentados os resultados de forças obtidas através da medição dos deslocamentos (decomposto em duas componentes) em relação à posição inicial do prumo no eixo dos xx (horizontal) e no eixo dos yy (vertical) (verificar eixos na figura 4.6), obtidos através da simulação numérica. Como as curvas de força-deslocamento não permitem uma linha de tendência única para a sua correcta descrição, cada uma das componentes de deslocamento foi dividida em três partes, como é possível verificar na figura 4.9.

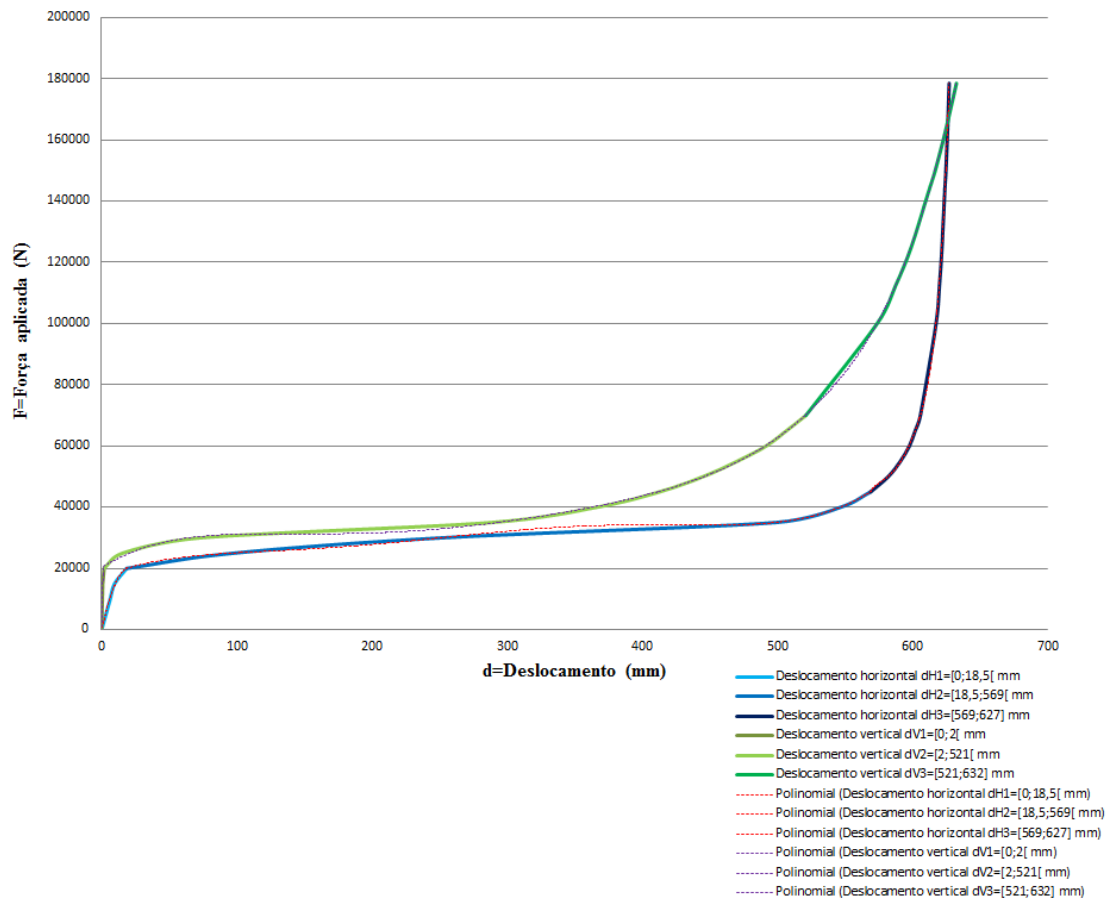



Figura 4.9 – Gráfico Força-Deslocamento (horizontal d_H e vertical d_V) do prumo C125.

Os deslocamentos, atingem um valor máximo de d_H=627,04 mm na direcção do eixo dos xx (deslocamento horizontal em relação à posição inicial) e de d_V=632,35 mm na direcção do eixo dos yy (deslocamento vertical em relação à posição inicial), para uma força máxima anteriormente mencionada de 178 500 N. A figura 4.10 apresenta o deslocamento final total (não decomposto) do prumo C125, onde se verifica uma grande capacidade de deformação antes do início de plasticidade total.

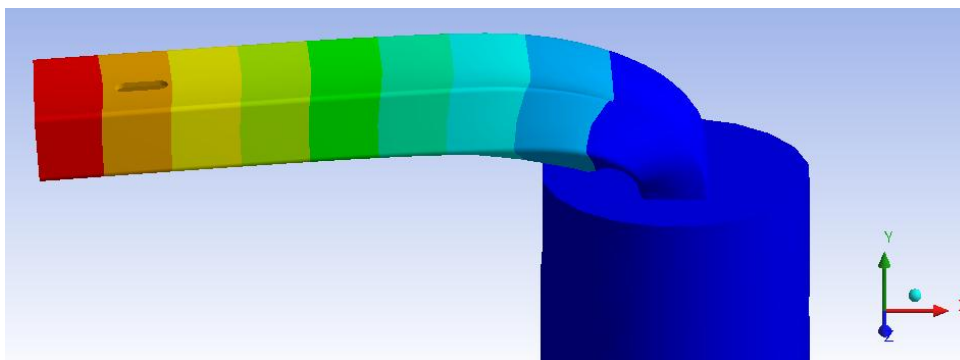



Figura 4.10 – Deslocamento final (total) do prumo C125 visualizando segundo o eixo dos zz.

Através do gráfico da figura 4.9 são tiradas as linhas de tendência (a traço interrompido) e como é possível verificar na figura. A regressão (R^2) destas linhas de tendência varia, para o deslocamento horizontal (d_H), entre 0,9971 e 1, e para o deslocamento vertical (d_V) entre 0,9983 e 1. Quando o valor da regressão atinge o valor de 1, é porque através da equação da linha de tendência é possível obter todos os pontos que descreveram a curva do gráfico, não necessariamente a perfeição da curva.

Para o cálculo da força (F) através do deslocamento horizontal (d_H) existem três equações, que variam entre três intervalos de deslocamento. Entre 0 e 18,5 mm para d_{H1}, entre 18,5 e 569 mm para d_{H2} e entre 569 e 627 mm para d_{H3}, como é possível verificar na legenda presente na figura 4.9.

As equações polinomiais que representam estas linhas, são apresentadas nas seguintes equações.

Para d_{H1} na equação (4.3).

$$F = -\left(48{,}105 \cdot {d_{H1}}^2\right) + (1993{,}4 \cdot d_{H1}) - 308{,}29 \tag{4.3}$$

Para d_{H2} na equação (4.4).

$$\begin{aligned} F = &\left(1 \times 10^{-8} \cdot {d_{H2}}^5\right) - \left(2 \times 10^{-5} \cdot {d_{H2}}^4\right) + \left(0{,}0084 \cdot {d_{H2}}^3\right) \\ &- \left(1{,}7554 \cdot {d_{H2}}^2\right) + (187{,}22 \cdot d_{H2}) + 17084 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Para d_{H3} na equação (4.5).

$$\begin{aligned} F = &\left(9 \times 10^{-6} \cdot {d_{H3}}^6\right) - \left(0{,}0313 \cdot {d_{H3}}^5\right) + \left(44{,}845 \cdot {d_{H3}}^4\right) - \left(34211 \cdot {d_{H3}}^3\right) \\ &+ \left(1 \times 10^7 \cdot {d_{H3}}^2\right) - (3 \times 10^9 \cdot d_{H3}) + 3 \times 10^{11} \end{aligned} \tag{4.5}$$

Para o cálculo da força (F) através do deslocamento vertical (d_V) existem três equações, que variam entre três intervalos de deslocamento. Entre 0 e 2 mm para d_{V1}, entre 2 e 521 mm para d_{V2} e entre 521 e 632 mm para d_{V3}, como é possível verificar na legenda presente na figura 4.9.

Para d_{V1} na equação (4.6).

$$F = -\left(6883{,}9 \cdot {d_{V1}}^{2}\right) + \left(23666 \cdot d_{V1}\right) - 236{,}04 \tag{4.6}$$

Para d_{V2} na equação (4.7).

$$F = \left(2 \times 10^{-8} \cdot {d_{V2}}^{5}\right) - \left(2 \times 10^{-5} \cdot {d_{V2}}^{4}\right) + \left(0{,}0109 \cdot {d_{V2}}^{3}\right) - \left(2{,}5743 \cdot {d_{V2}}^{2}\right) + \left(276{,}69 \cdot d_{V2}\right) + 20236 \tag{4.7}$$

Para d_{V3} na equação (4.8).

$$F = \left(6 \times 10^{-6} \cdot {d_{V3}}^{4}\right) + 0{,}027 \cdot {d_{V3}}^{3} - \left(51{,}1 \cdot {d_{V3}}^{2}\right) + \left(28460 \cdot d_{V3}\right) - 5 \times 10^{6} \tag{4.8}$$

O valor da força (F) obtida, não pode ser superior à força máxima, mencionada anteriormente, de 178 500 N.

Em seguida é feita a análise da relação tensão equivalente máxima-força aplicada (figura 4.11). Com a força calculada anteriormente é possível assim verificar as tensões envolvidas.

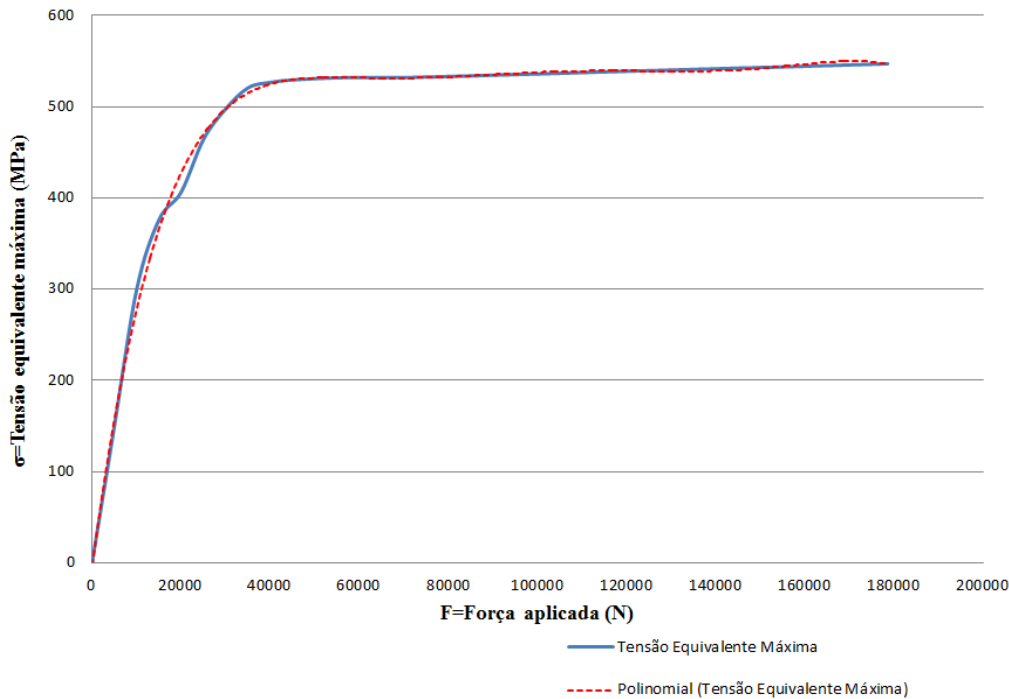



Figura 4.11 – Gráfico Tensão equivalente máxima-Força do prumo C125.

Através dos valores do gráfico da figura 4.11 obtém-se a curva de tendência que descreve com boa aproximação a curva de tensão equivalente máxima-força. É também possível visualizar na mesma figura a regressão da linha de tendência, que é de 0,9981.

A equação que descreve esta curva de tendência é uma equação polinomial de sexto grau, e está presente na equação (4.9).

$$\sigma_{EM} = -(6 \times 10^{-28} \cdot F^6) + (4 \times 10^{-22} \cdot F^5) - (1 \times 10^{-16} \cdot F^4) + (1 \times 10^{-11} \cdot F^3) - (1 \times 10^{-6} \cdot F^2) + (0{,}037 \cdot F) - 2{,}0311 \tag{4.9}$$

Para a última força aplicada, antes da não convergência de solução (antes da entrada em plasticidade total do material) a tensão equivalente máxima é de 547,05 MPa e encontra-se, como esperado, próximo da extremidade inferior do prumo como mostra a figura 4.12.

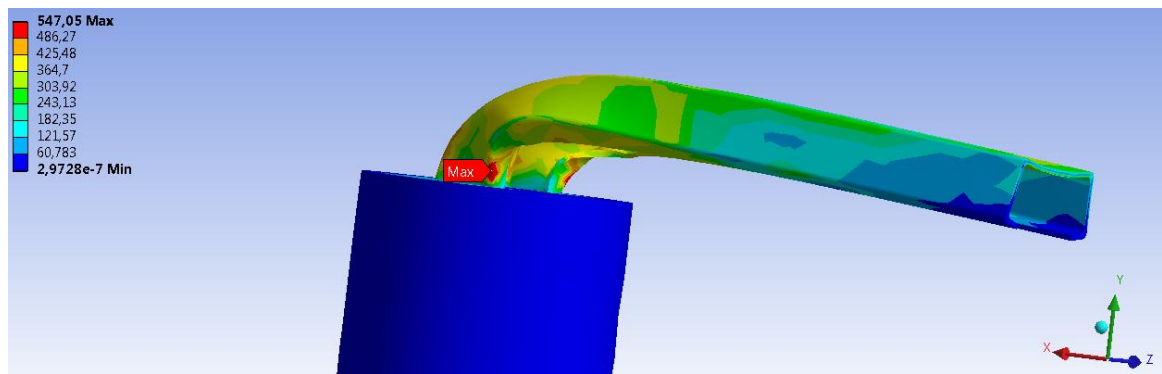



Figura 4.12 – Localização da tensão equivalente máxima final (C125).

4.1.1 Conclusões do prumo C125

É possível verificar que este prumo suporta grandes deformações antes de atingir a plasticidade total da sua secção. Contudo, para deformações e deslocamentos elevados, a sua funcionalidade num embate directo é quase desprezável. Ainda assim, para embates semelhantes aos analisados numericamente (na direcção do prumo) que resultem em pequenos deslocamentos, a sua função de absorção é viável. É assim possível fazer o cálculo inverso e através dos deslocamentos medidos calcular a força (equações (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8)), e a partir desta, através da equação (4.2), verificar a velocidade de embate para um veículo conhecido.

É possível ainda através das força calculada, obter a tensão equivalente máxima envolvida, por via da equação (4.9).

Para tal é necessário que a força calculada não exceda o ponto de não convergência (178 500 N) e finalmente que o prumo esteja devidamente encastrado no solo.

4.2 Prumo UPN120

Este é o segundo prumo a ser analisado, UPN120 (para dimensões, ver Anexo F). Na figura 4.13 é possível verificar as condições de fronteira aplicadas a este prumo, um encastramento (A) que representa a fixação do prumo abaixo da linha do solo e a força aplicada através da base de contacto com o espaçador, neste caso na lateral do perfil (B). O cilindro, onde se encontra "A" é uma forma simplificada de representação do encastramento do prumo ao solo e estende-se por 1050 mm dos 1700 mm de comprimento total do prumo. A força "B" é aplicada na perpendicular à face seleccionada (direcção do eixo dos zz).

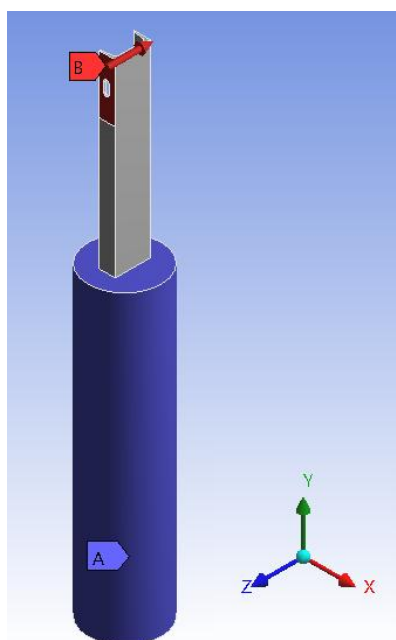



Figura 4.13 – Prumo UPN120 – Restrições, aplicação de força e sistema de eixos.

No caso deste prumo UPN120 as condições são um pouco diferentes, não só pela diferença de perfil como pela posição onde é aplicada a força, na lateral (figura 4.14).

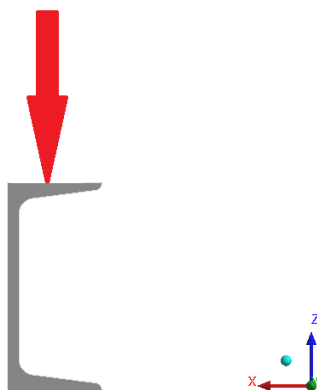



Figura 4.14 – Força aplicada no prumo UPN120. Vista de topo.

O estudo executado apresenta a curva de relação tensão equivalente máxima-força e curva de força-deslocamento máximo (no eixo dos zz e yy).

É utilizada malha grosseira, com refinação de 50 na opção "*Relevance*", de modo a introduzir simetria na mesma relativamente ao prumo. Esta malha é então constituída por 2788 elementos SOLID187, apresentando a seguinte definição (figura 4.15).

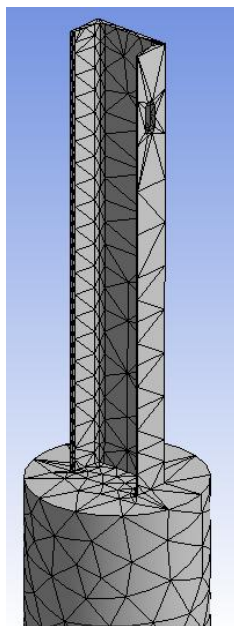



Figura 4.15 – Prumo UPN120 – Definição da malha grosseira.

Verifica-se, por tentativa erro, que a última força aplicada para a qual existe convergência acontece a F=29 200 N.

Na figura 4.16 são apresentados os resultados de força através dos deslocamentos obtidos no eixo zz (horizontal) e no eixo dos yy (vertical), obtidos através da simulação numérica, em relação à posição inicial do prumo (verificar eixos na figura 4.13).

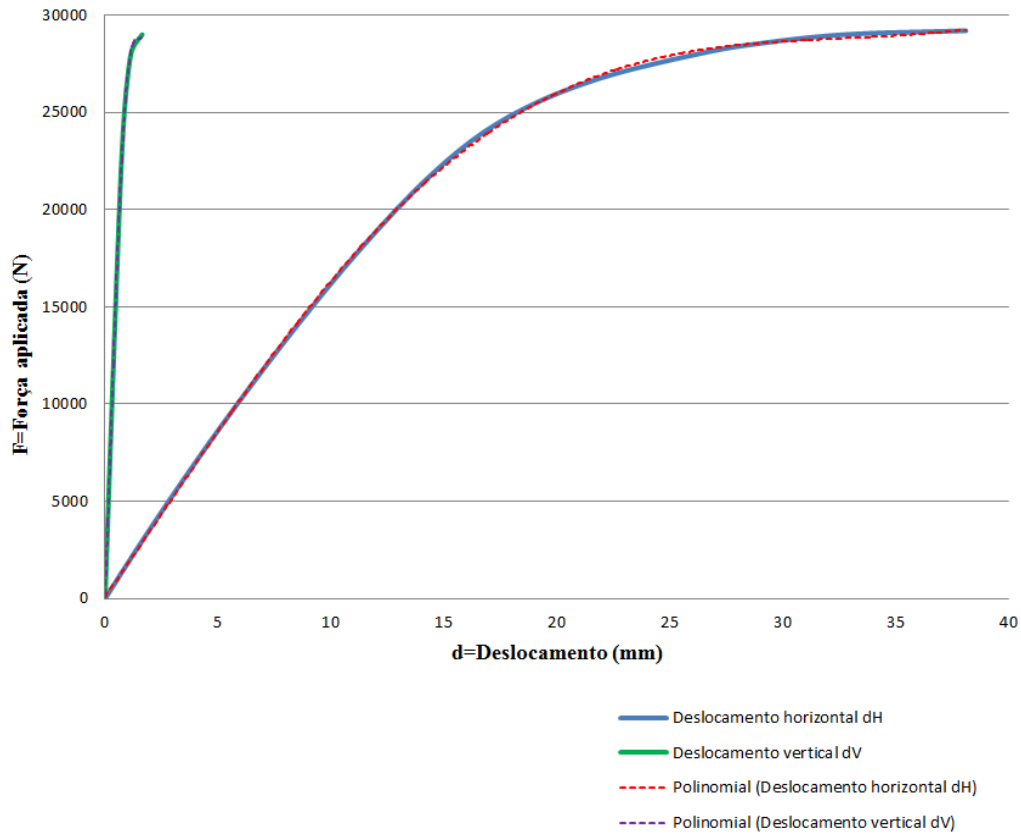



Figura 4.16 – Gráfico Força-Deslocamento (horizontal d_H e vertical d_V) do prumo UPN120.

Para o caso dos deslocamentos, estes atingiram um valor máximo de d_H=38,12 mm no eixo dos zz (deslocamento horizontal em relação à posição inicial) e de d_V=2,15 mm no eixo dos yy (deslocamento vertical em relação à posição inicial).

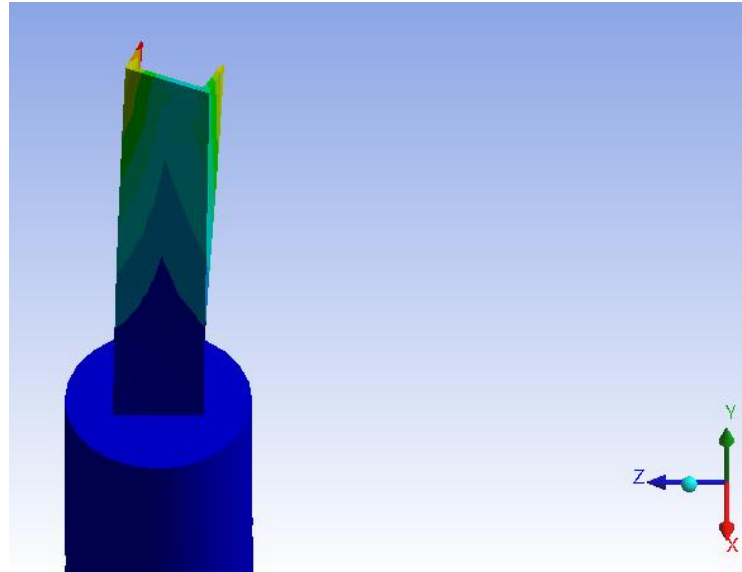



Figura 4.17 – Deslocamento final do prumo UPN120 visualizando segundo o eixo dos xx.

Para o gráfico presente na figura 4.16 são tiradas as linhas de tendência (a traço interrompido) cuja regressão para o deslocamento horizontal (d_H) é de 0,9999 e de 0,9998 para o deslocamento vertical (d_V). Como é possível verificar, as linhas de tendência representam o comportamento das curvas de deslocamento de um forma bastante próxima como é possível verificar pelo valor de regressão das mesmas.

A equação (4.10) representa a linha de tendência para a curva de força-deslocamento horizontal e é uma equação polinomial de quinto grau.

$$F = -\left(0{,}0005 \cdot {d_H}^5\right) + \left(0{,}0781 \cdot {d_H}^4\right) - \left(3{,}4017 \cdot {d_H}^3\right) + \left(22{,}769 \cdot {d_H}^2\right) + \left(1661{,}7 \cdot d_H\right) + 106{,}23 \qquad (4.10)$$

Por sua vez, para a curva de força-deslocamento vertical, a equação (4.11) representa a respectiva curva de tendência, com uma equação polinomial do quarto grau.

$$F = \left(9980 \cdot {d_V}^4\right) - \left(34349 \cdot {d_V}^3\right) + \left(23128 \cdot {d_V}^2\right) + \left(27960 \cdot d_V\right) + 187{,}26 \qquad (4.11)$$

O valor da força (F) obtida, não pode ser superior à força máxima, mencionada anteriormente, de 29 200 N.

Em seguida é feita a análise da relação tensão equivalente máxima-força aplicada (figura 4.18). Com a força calculada anteriormente é possível assim verificar as tensões envolvidas.

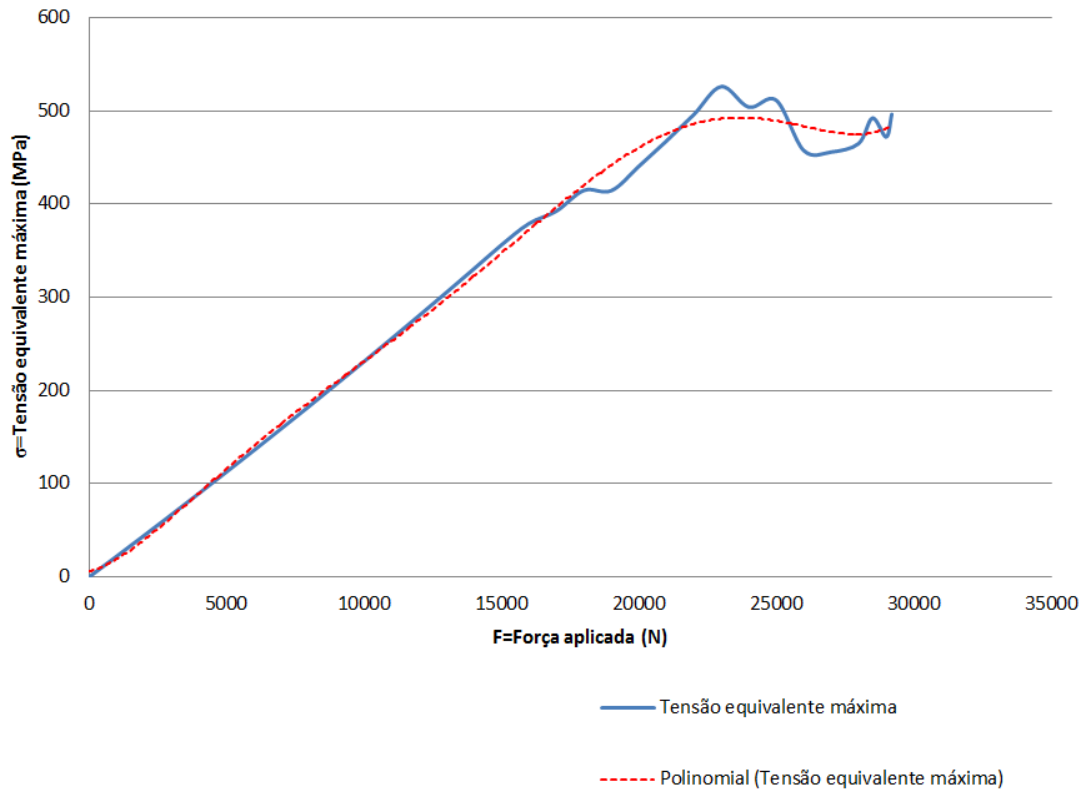



Figura 4.18 – Gráfico Tensão equivalente máxima-Força do prumo UPN120.

A figura 4.18 apresenta uma linha de tendência da curva força-tensão equivalente máxima cujo valor de regressão de 0,9956. Valor próximo de 1, mas que como se pode visualizar na figura, não representa alguns máximos e mínimos relativos da curva. Contudo, o seu comportamento é aproximado ao da curva.

Os valores de tensão equivalente máxima variam, visto que os pontos onde se situa essa mesma tensão no perfil UPN também se alteram com a variação de força.

A equação (4.12) representa a linha de tendência presente na figura 4.18.

$$\sigma_{EM} = (3 \times 10^{-23} \cdot F^6) - (2 \times 10^{-18} \cdot F^5) + (7 \times 10^{-14} \cdot F^4) - (1 \times 10^{-9} \cdot F^3) + (6 \times 10^{-6} \cdot F^2) + (0{,}0078 \cdot F) + 5{,}873 \quad (4.12)$$

Para a última força aplicada, antes da não convergência de solução (antes da entrada em plasticidade total do material) a tensão equivalente máxima é de 496,52 MPa como é possível verificar na figura 4.19.

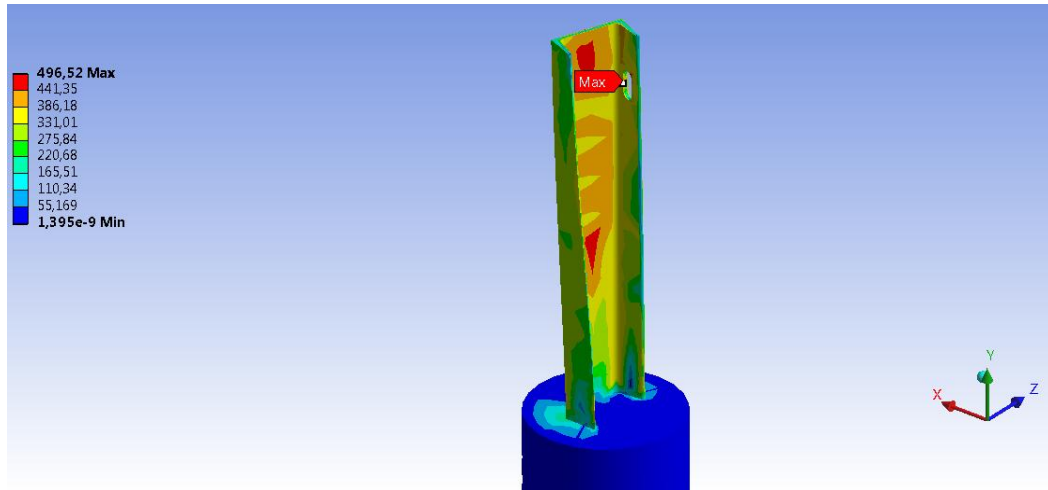



Figura 4.19 – Localização da tensão equivalente máxima final (UPN120).

A figura 4.19 indica que o local de tensão equivalente máxima para a força final de 29 200 N situa-se no local do furo onde é aparafusado o espaçador. Sendo esta a força final, quer dizer que o material atingirá plasticidade máxima nesse local.

4.2.1 Análises alternativas ao prumo UPN120

Como a análise verifica que a tensão máxima no furo de aparafusagem do espaçador, e de modo a que tal situação não coloque em causa a análise, pois o furo pode estar a induzir em erro a análise do comportamento do prumo, é efectuada nova análise para um prumo UPN120 semelhante, mas sem furo.

A figura 4.20 indica o novo local de tensão equivalente máxima antes da não convergência de solução, cujo valor é de 448,76 MPa.

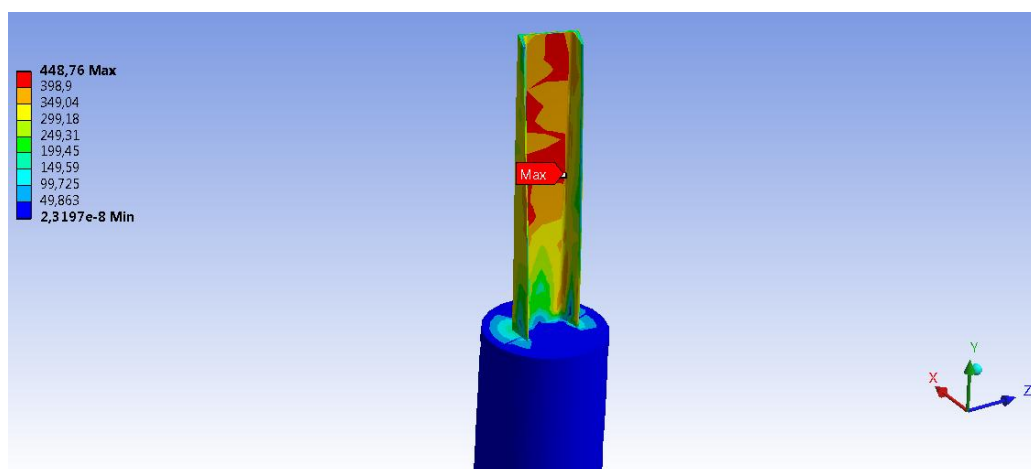



Figura 4.20 – Localização da tensão equivalente máxima final (UPN120 sem furo).

Contudo, a supressão do furo não traz à solução uma diferença substancial da força máxima aplicada antes da não convergência de solução. A força máxima para o prumo UPN120 sem furo é de sensivelmente 29 500 N.

Assim é possível considerar o prumo UPN120 com furo como um representante viável do comportamento desta estrutura.

Por outro lado, como o prumo verifica uma menor deformação no sentido de aplicação da força, originando uma rotação do prumo, é efectuada a análise do mesmo com uma força remota à face de ligação ao espaçador com localização na linha do centro de massa deste perfil (figura 4.21), de modo a verificar se o comportamento do mesmo aparenta ser mais correcto, resistindo a uma maior força, deformando mais, e apresentando um menor momento torsor.

O local de aplicação da força é apresentado na figura 4.21.

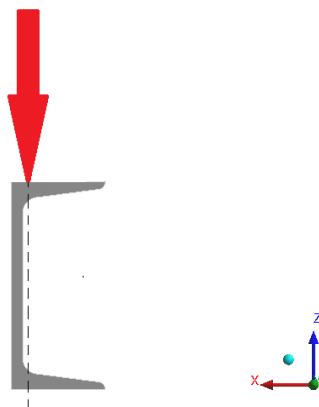



Figura 4.21 – Força aplicada no prumo UPN120 na linha do centro de massa. Vista de topo.

Assim para a uma força remota à face de aperto do espaçador, aplicada na linha do centro de massa do prumo, regista-se que a força máxima suportada pelo prumo é de 38 500 N. A figura 4.23 verifica o local de tensão equivalente máxima registada no prumo, no valor de 440,11 MPa.

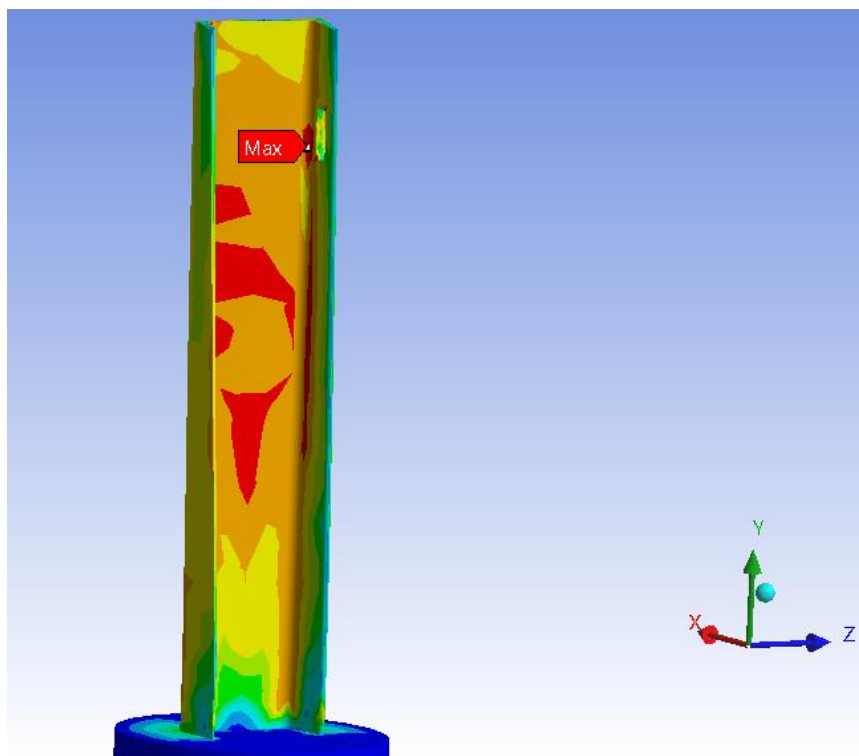



Figura 4.22 – Localização da tensão equivalente máxima final no prumo UPN120 com força remota (38,5 kN) aplicada na linha centro de massa.

Os deslocamentos por sua vez registaram valores máximos de d_H=31,35 mm no eixo dos zz (deslocamento horizontal em relação à posição inicial) e de d_V=1,55 mm no eixo dos yy (deslocamento vertical em relação à posição inicial), como é possível verificar na figura 4.25.

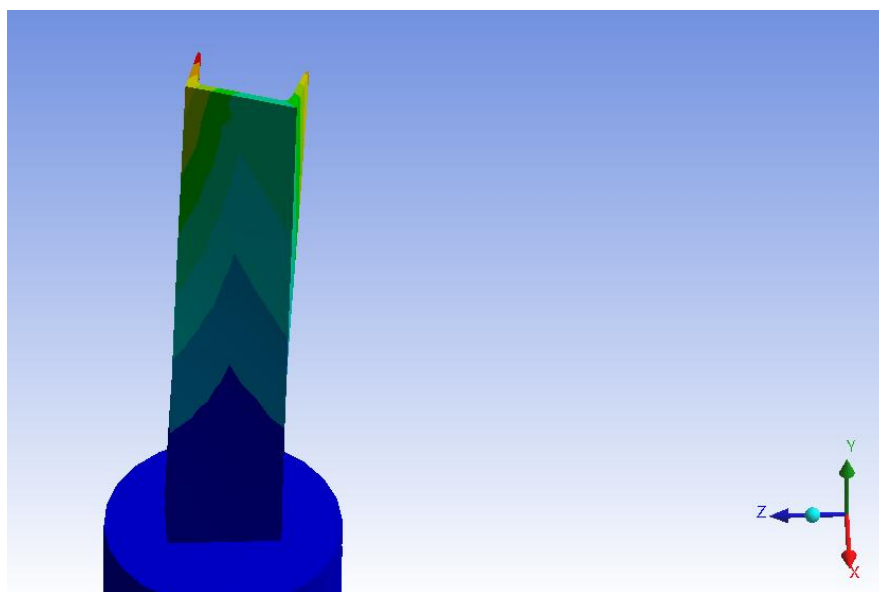



Figura 4.23 – Deslocamento final (total) do prumo UPN120 com força remota aplicada no centro de massa.

É possível verificar que a força máxima suportada por este prumo, com força remota aplicada na linha do centro de gravidade do perfil UPN120, é superior à do prumo estudada inicialmente. Contudo, embora origine uma rotação menor, essa diferença não é muito significativa, podendo-se verificar inclusivamente que os deslocamentos finais são inferiores aos efectuados na primeira análise. Como na realidade a força aplicada no prumo não é realmente aplicada sobre a linha do centro de massa, e tendo em conta a diferença de resultados, considera-se a primeira análise mais coerente.

4.2.2 Conclusões do prumo UPN120

É possível assim concluir que o prumo UPN120 apresenta uma menor capacidade de deformação que o C125 para o mesmo tipo de embate. A rotação origina plasticidade para uma força menor. Contudo é necessário verificar que a análise não contabiliza a capacidade de deformação do prumo, perante a força de impacto do veículo, para além da total plastificação da secção do prumo (onde resiste contudo a uma muito menor força até à deformação final ou total fractura do mesmo). É também necessário verificar que o prumo é apenas um elemento de sustentação das barreiras, e que a sua função no local de embate não é a de deformar e suster o veículo, mas sim deformar e deixar a barreira funcionar como sistema multicorpo, sendo que os restantes prumos, esses sim devem suportar a força aplicada pela barra longitudinal. Estes prumos, podem ser importantes ainda assim, tal como no prumo C125, para forças aplicadas de baixo valor, onde para pequenos choques, possa suportar o veículo.

A análise feita ao prumo sem furo para aperto do espaçador verifica que a diferença de força máxima suportada pelo prumo não é relevante, com valores na ordem de 300 N, e com a localização da tensão equivalente máxima a variar muito pouco. De tal forma que é possível considerar a primeira análise como válida.

Finalmente a segunda análise alternativa, com força aplicada na linha do centro de massa (figura 4.21) verifica que o tipo de deformação presente no prumo é semelhante, apresentando rotação e deslocamentos verticais e horizontais da mesma ordem de valores. Contudo verifica-se que a força máxima obtida antes da não convergência de solução é superior à da primeira análise, com uma diferença de sensivelmente 9 300 N, de 38 500 para 29 200 N. Assim, tendo em conta a função do prumo num embate directo, e tendo

em conta os deslocamentos finais obtidos, é possível considerar a primeira análise como uma análise válida.

Embora não seja possível verificar nos resultados obtidos para o prumo UPN120 a mesma confiança dos obtidos para prumo C125 é possível ainda assim fazer o cálculo inverso e através dos deslocamentos medidos calcular a força (equações (4.10) e (4.11)), e a partir desta, através da equação (4.2), verificar a velocidade de embate para um veículo conhecido.

É possível ainda através das força calculada, obter a tensão equivalente máxima envolvida, por via da equação (4.12).

Para tal é necessário que a força calculada não exceda o ponto de não convergência (29 200 N) e finalmente que o prumo esteja devidamente encastrado no solo.

4.3 Espaçador tipo II

Por fim é estudado o comportamento do elemento de ligação entre o prumo e a barra longitudinal, o espaçador, tipo II (5) neste caso (para dimensões, ver Anexo G).

São tomadas em conta as medidas presentes no Anexo G, e elaborada uma representação numérica do mesmo, que apresenta por fim o formato presente na figura 4.24. Nesta mesma figura é possível verificar as condições de fronteira, a fixação (A), encastramento, e a força aplicada (B).

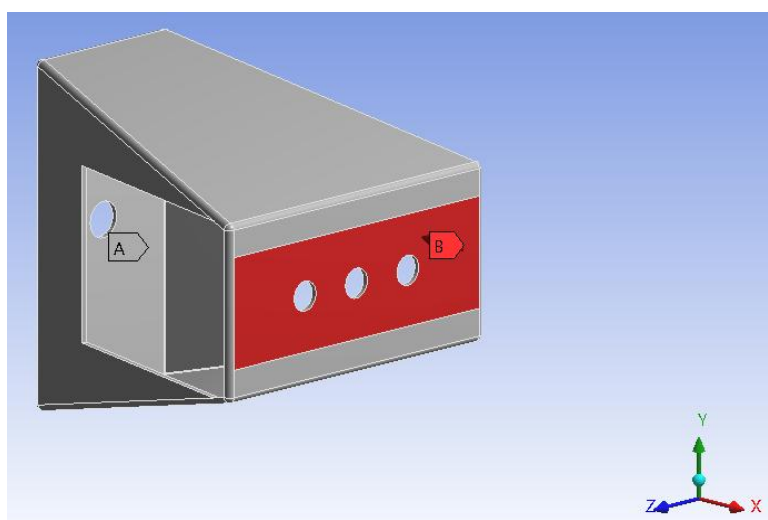



Figura 4.24 – Representação do espaçador tipo II.

Na vista superior do espaçador, a fixação é feita na face anterior do espaçador (A) e a força aplicada na face oposta (B), na direcção do eixo dos xx como é possível verificar na figura 4.25 (verificar também o sistema de eixos).

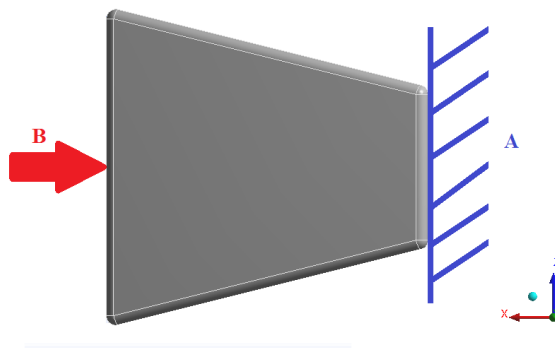



Figura 4.25 – Fixação e força aplicada no espaçador tipo II. Vista superior.

O estudo feito para diferentes valores de força apresenta a curva de relação tensão equivalente máxima-força e curva de força-deslocamento.

É utilizada malha grosseira, pois demonstra um correcto comportamento. Esta malha é então constituída por 8780 elementos SOLID187, apresentando a seguinte definição (figura 4.26).

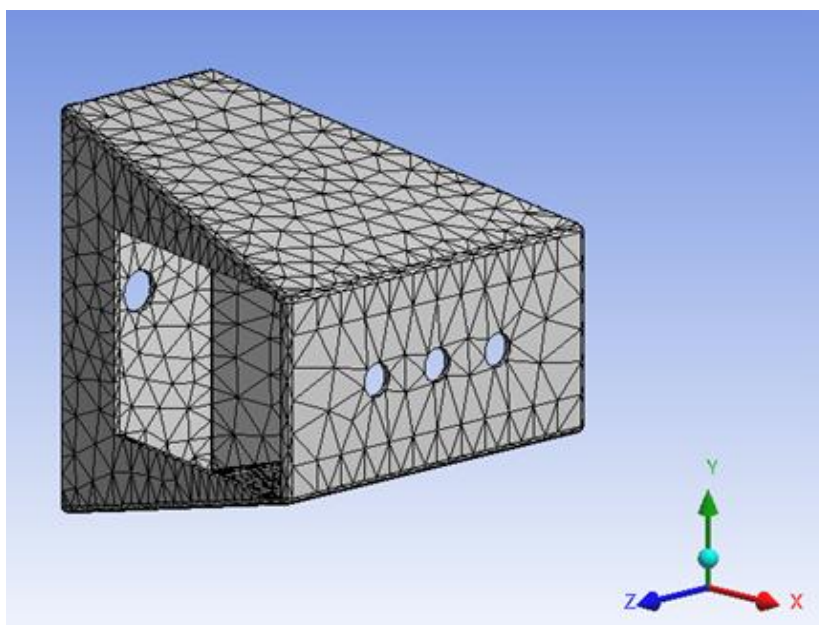



Figura 4.26 – Amortecedor tipo II – Definição da malha grosseira.

Verifica-se, por tentativa erro, que a última força aplicada para a qual existe convergência acontece a F=31 500 N.

Na figura 4.27 encontra-se o gráfico representante do deslocamento sofrido no espaçador, no valor máximo de d=9,96 mm.

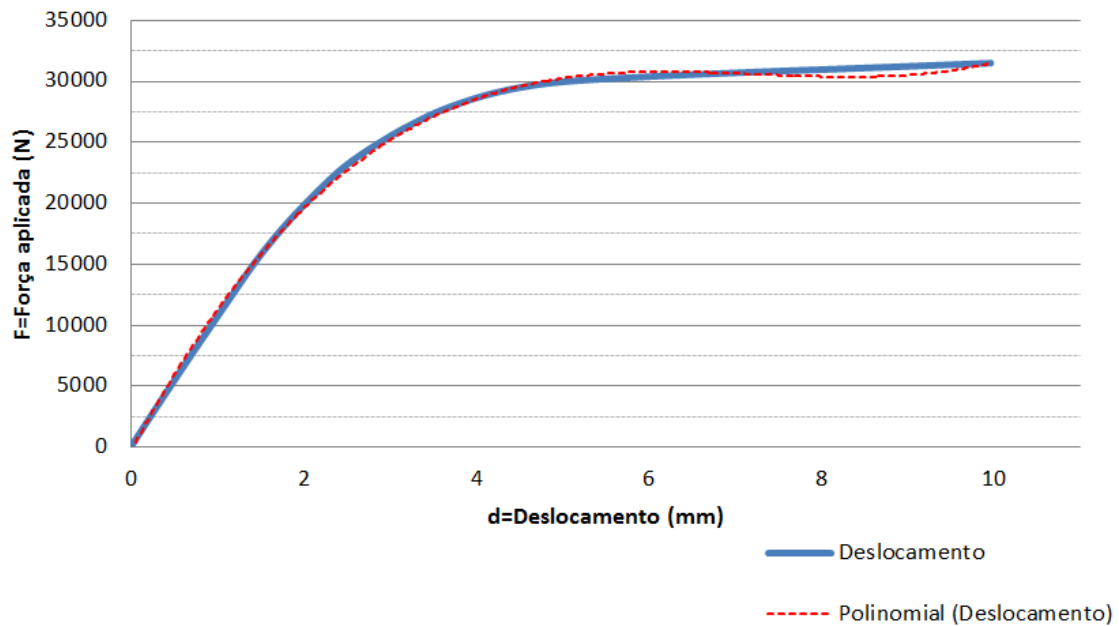



Figura 4.27 – Gráfico Força-Deslocamento do espaçador tipo II.

Através da curva presente no gráfico da figura 4.27 é retirada a linha de tendência (a traço interrompido), cuja regressão apresenta o valor de 0,992.

A equação (4.13) é uma equação polinomial de terceiro grau e representa a linha de tendência presente no gráfico da figura 4.27.

$$F = (86{,}346 \cdot d^3) - (1881{,}1 \cdot d^2) + (13366 \cdot d) - 346{,}19 \tag{4.13}$$

Por fim, a figura 4.28 apresenta o deslocamento final apresentado pela simulação.

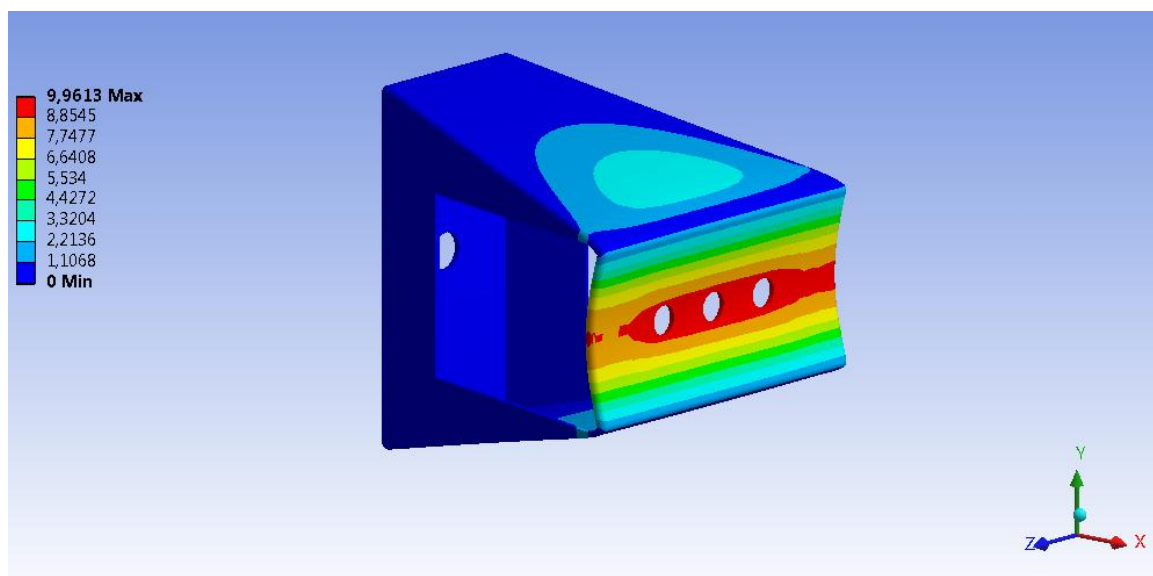



Figura 4.28 – Deslocamento final do espaçador tipo II.

Através da simulação numérica é também possível obter a seguinte curva de tensão equivalente máxima-força, presente na figura 4.29.

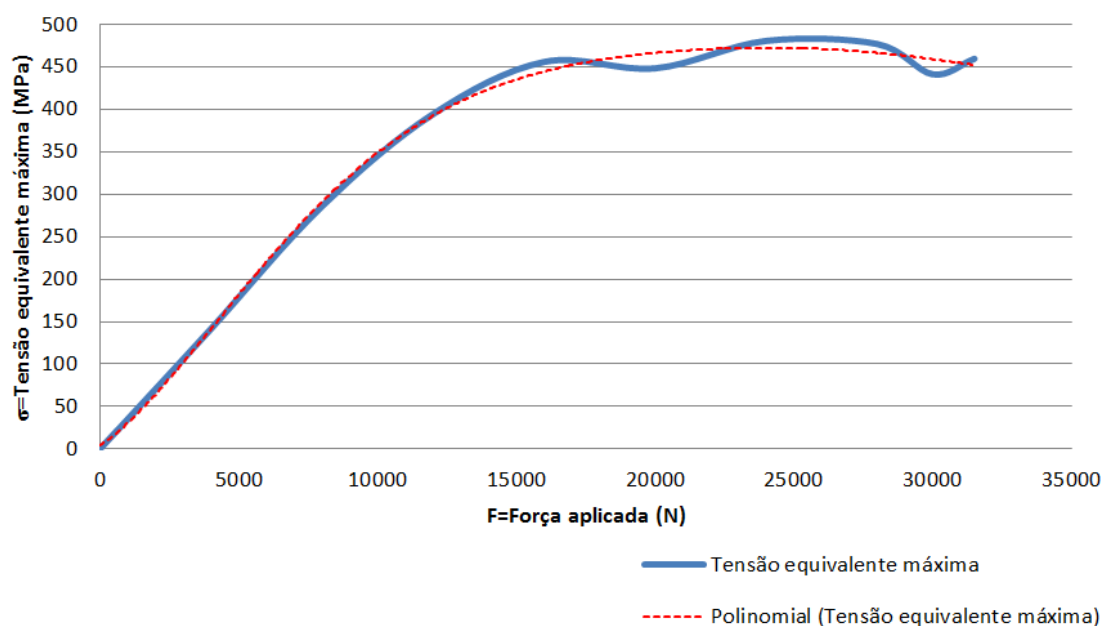



Figura 4.29 – Gráfico Tensão equivalente máxima-Força do espaçador tipo II.

É possível verificar na figura 4.29 a linha de tendência da curva tensão equivalente máxima-força, que tem um valor de regressão de 0,9975, falhando a representação de alguns máximos e mínimos relativos.

A equação polinomial que descreve esta linha de tendência é de sexto grau e tem como expressão a equação (4.14).

$$\sigma_{EM} = (6 \times 10^{-24} \cdot F^6) - (7 \times 10^{-19} \cdot F^5) + (3 \times 10^{-14} \cdot F^4) - (7 \times 10^{-10} \cdot F^3) + (5 \times 10^{-6} \cdot F^2) + (0{,}0213 \cdot F) + 4{,}3289 \quad (4.14)$$

Os valores de tensão equivalente máxima variam, visto que os pontos onde se situa essa mesma tensão no espaçador também se alteram com a variação de força.

A figura 4.30 indica a localização da tensão equivalente máxima antes da não convergência de solução, cujo valor é de 459,75 MPa.

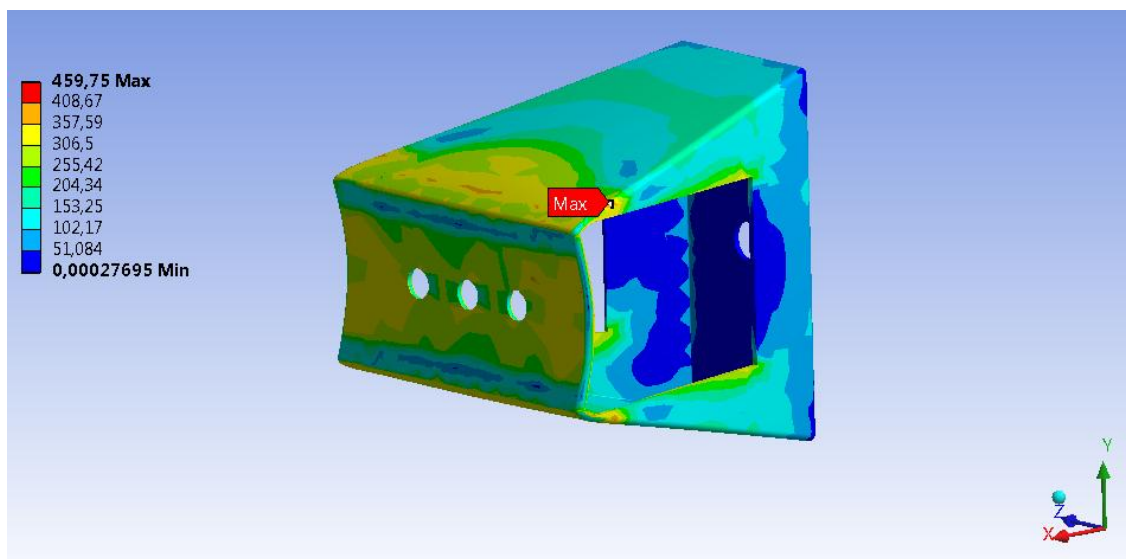



Figura 4.30 – Localização da tensão equivalente máxima final do espaçador tipo II.

De salientar que análise executada no espaçador não é feita em conjunto com os prumos, mas sim individualmente.

4.3.1 Análise experimental

É efectuada uma análise experimental de compressão a um espaçador semelhante a este, tipo II, na máquina de ensaio de tracção/compressão “Dartec M1000 R/D” (figura 4.31).

Figura 4.31 – Máquina de ensaio de tracção/compressão Dartec M1000 R/D.

A figura 4.32 apresenta o espaçador antes do ensaio de compressão.

Figura 4.32 – Espaçador tipo II antes do ensaio experimental.

O ensaio foi executado com a compressão executada sobre uma barra de força, com largura de 63,5 mm (figura 4.33), daí a análise numérica efectuada anteriormente consistir numa força aplicada apenas numa área da totalidade da face de contacto com a barra longitudinal (figura 4.24).

Figura 4.33 – Barra utilizada no ensaio de compressão do espaçador tipo II.

O ensaio foi efectuado limitando o deslocamento do cilindro de compressão, levando à deformação final da face do espaçador com um deslocamento de sensivelmente 110 mm (que incluí algum ajustamento inicial) como se pode verificar na figura 4.34 e figura 4.35.

Figura 4.34 – Espaçador tipo II após do ensaio experimental.

Deste ensaio é possível retirar o gráfico de força-deslocamento presente na figura 4.35. Aqui verifica-se que a força máxima aplicada ao espaçador foi de 37 786 N para um deslocamento total de sensivelmente 101 mm.

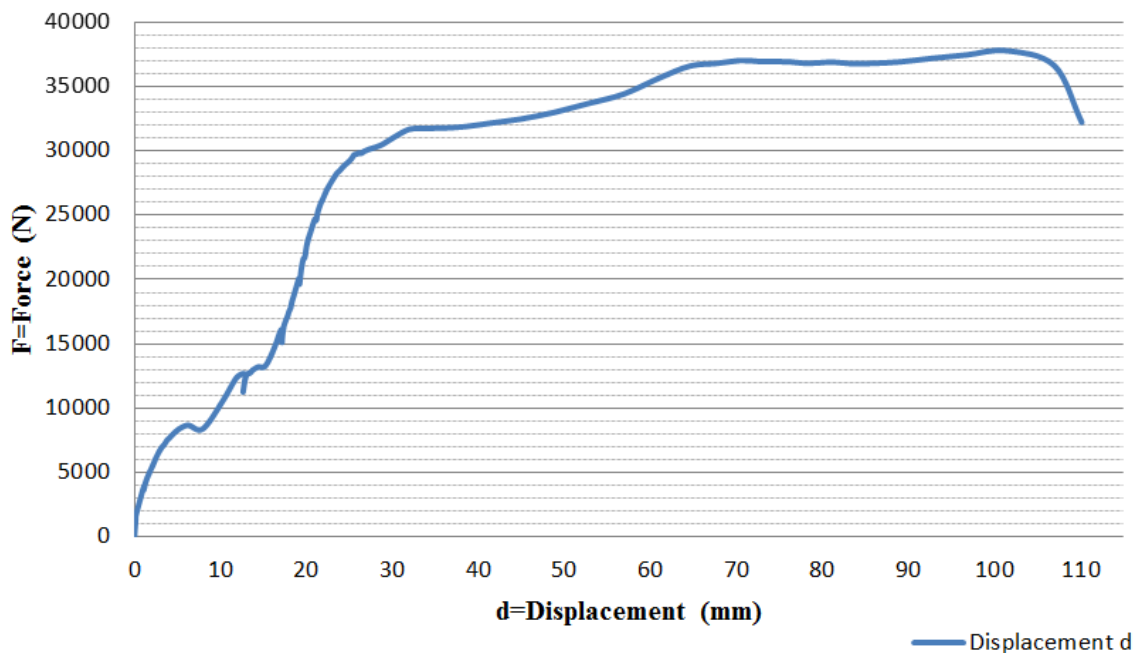



Figura 4.35 – Gráfico Força-Deslocamento do ensaio experimental ao espaçador tipo II.

O material verificou ser bastante dúctil, verificando apenas o início de fractura presente na figura 4.36

Figura 4.36 – Início de fractura do espaçador tipo II.

4.3.2 Conclusões do espaçador tipo II

Após a execução da análise experimental é possível verificar as diferenças desta perante a análise numérica.

É possível verificar que a força máxima aplicada é maior no ensaio experimental (37 786 N) que na análise numérica (31 500 N).

O local de tensão máxima calculado na análise numérica, presente na figura 4.30, verifica que o local onde a plasticidade do material é maior, o local de tensão máxima, é aproximadamente o mesmo onde ocorre a início da fractura do material na figura 4.36.

Contudo, a deformação medida na análise numérica não se assemelha à deformação total imposta no espaçador real. Isto acontece porque o ensaio foi limitado em deslocamento e não força, ou seja, o deslocamento final não corresponde ao início da fractura. Na realidade inclusivamente tal deformação como a presente na figura 4.34 não acontece. De salientar ainda que a análise numérica não estuda a deformação além da

entrada em plasticidade total da secção, ao invés do ensaio experimental que só terminou quando o curso do cilindro chegou ao limite estipulado.

A questão do deslocamento também não é o mais importante, mas sim saber comportamento do espaçador, admitindo um deslocamento exagerado de modo a levar a peça à fractura, podendo assim verificar o local de tensão máxima e as forças envolvidas.

As diferenças ao nível da força máxima aplicada podem prender-se com vários motivos, como por exemplo a incorrecta análise numérica. Contudo existem dois aspectos importantes que podem contribuir para esta situação e que estiveram presentes neste ensaio. Em primeiro lugar as diferenças geométricas. O espaçador foi representado a nível numérico segundo as medidas presentes na referência (25) (e presentes no Anexo G), que verificaram estar de acordo com as medidas presentes no espaçador real antes do ensaio, contudo, não existe precisão nestas mesmas medidas aquando do fabrico da peça, sendo que os valores são apenas aproximados na peça real. Existe ainda soldadura e portanto o espaçador não é uma peça única nem todas as faces estão em contacto. Em segundo lugar estão as características do material. A análise do material executada anteriormente neste trabalho é elaborada com provetes retirados de outro espaçador, que não o ensaiado, o que consequentemente pode levar a diferenças nas características do material.

Apesar disto, e com a possibilidade de variação de resultados devido às questões mencionadas anteriormente, os resultados obtidos entre a análise numérica e experimental do espaçador são muito próximos, com uma força máxima da mesma ordem de grandeza (com uma diferença de sensivelmente 6286 N) e uma localização de tensão equivalente máxima semelhante em ambas as análises, o que credibiliza a análise numérica.

É possível de forma semelhante verificar através da equação (4.13) acima as forças e deslocamentos, contudo, e relacionar com a equação (4.2), contudo, como os resultados obtidos terão pouco validade real, visto que em caso de embate, e por via da verificação de cenários de colisões, a deformação do espaçador é desprezável quando em comparação com o prumo. É possível também para este caso verificar as tensões envolvidas através da força calculada, por via da equação (4.13).

5 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O estudo efectuado sobre as ligações (solo e prumo-barra longitudinal, prumo e espaçador respectivamente) das barreiras de protecção rodoviária permite obter uma perspectiva, do comportamento de dois diferentes prumos, que por observação no terreno, se verificam ser os mais comuns. Este trabalho permite também a interacção com um novo programa, o *ANSYS*, e a absorção de um conhecimento do estado da arte desta área de estudo, onde se incluem estruturas, legislação, bibliografia, entre outros.

A revisão bibliográfica permite afirmar que as barreiras de protecção rodoviárias não metálicas têm uma melhor eficiência, como é disso exemplo a barreira de betão híbrida presente na figura 1.20 e no Anexo B, contudo, custo inferior das barreiras metálicas torna-as mais comuns.

A análise numérica efectuada neste estudo verifica que este mesmo programa permite estudar o comportamento de estruturas no domínio plástico, com inserção de material próprio e com características mais elaboradas a nível plástico.

Relativamente à análise específica dos componentes de ligação, o estudo efectuado é muito específico, pois efectua uma análise de ordem estática, sobre acção de uma força que é exercida precisamente no local de fixação do prumo. A análise estática por sua vez não permite verificar o comportamento das estruturas após a entrada no domínio plástico de toda a secção da estrutura, pelo que não é possível observar a real forma final da peça.

O estudo é efectuado peça a peça, pelo que tal não corresponde à realidade e o sistema antes de chegar ao espaçador e ao prumo já dissipa alguma energia por deformação do mesmo.

Esta análise estática traz contudo informação importante, embora que num ambiente restrito.

A análise permite verificar que o prumo C125 tem melhores capacidade de absorção de energia que o prumo UPN120. Tal deve-se ao facto de as laterais do prumo em relação à direcção de aplicação de força serem diferentes entre estes dois tipos de prumo. No C125, as laterais são simétricas, pelo que o comportamento de deformação do prumo mantém sempre a direcção da força. Por sua vez, o prumo UPN120 está posicionado

lateralmente em relação à direcção de aplicação da força, o que origina um momento torsor. Nem mesmo a força aplicada na linha do centro de massa permite um comportamento diferente. Até à plasticidade total da secção do UPN120 este verifica uma capacidade de deformação bastante inferior ao C125, que permite uma aplicação de força de sensivelmente 178 500 N, longe dos 29 200 N do UPN120. A deformação presente neste último prumo (UPN120) também não é significativa antes de atingir as forças de não convergência de solução como é possível visualizar através dos deslocamentos finais na figura 4.17, com um valor máximo de deslocamento na direcção de aplicação da força de 31,12 mm em comparação com os 627,04 mm do prumo C125. Para o prumo UPN120, tal não corresponde totalmente à realidade visto que o veículo ao embater poderia originar a rotação do prumo, mas contudo, iria continuar a exercer força neste, mesmo que não aplicada especificamente na face inicial de aplicação da força.

A análise efectuada ao espaçador tipo II verifica uma deformação não muito significativa, como aliás é de esperar. A observação de locais de embate verifica que a deformação do espaçador em comparação com o prumo é quase desprezável. Em comparação com o ensaio prático verificam-se forças aplicadas, da mesma ordem de grandeza, entre 30 e 40 kN, e o semelhante localização do local de tensão máxima, onde se originará a fractura, comparando com o ensaio experimental, pelo que se pode considerar válida a análise experimental ao mesmo.

Não é possível assumir um conjunto de duas peças na análise estática efectuada, para qualquer uma das configurações. Tal acontece porque a força máxima suportada pelo espaçador tipo II for superior à que gera o início da plasticidade no prumo, para ambos os casos. Para o prumo UPN120, a força máxima suportada é inclusive inferior à do espaçador. Tal também não acontece para o prumo C125, cuja tensão equivalente máxima para a força que gera à plasticidade total de secção do espaçador (31 500 N), é de sensivelmente 508 MPa, portanto já dentro do domínio plástico.

Tendo em conta que o objectivo do prumo é ceder, rompendo a ligação com o espaçador, como é possível verificar na figura 4.2, pelo menos o prumo C125 demonstra um correcto funcionamento.

Uma das principais mais-valias a retirar deste trabalho com aplicação à realidade têm que ver com a medição dos deslocamentos (d, d_H e d_V) no prumo, e através das equações

de força-deslocamento, obter as forças (F) envolvidas no embate. A partir destas, para um embate de baixa energia cinética na direcção do prumo, e com características do veículo conhecidas, conhecer a sua velocidade de embate. Para tal, basta utilizar a equação (4.2). Passível de ser aplicado no prumo UPN120 é essencialmente direccionada para o prumo C125 que apresenta um comportamento de deformação mais próximo do esperado.

As equações obtidas na análise numérica podem também servir para a programação do comportamento destas estruturas em análises dinâmicas, através de programação, e terão real impacto numa análise que por si só apresenta resultados mais próximos da realidade.

Para além do ensaio experimental efectuado para o espaçador do tipo II é conveniente a análise experimental de ambos os prumos com vista à validação dos resultados numéricos. Tal não foi possível por falta de tempo aquando o surgimento de meios (Dartec M1000 R/D) que inclusivamente possibilitam a análise experimental ao espaçador tipo II aqui apresentada. Outro motivo prende-se com o facto dos meios disponíveis, ainda assim poderem ser insuficientes, visto que a deformação do prumos se espera mais elevada, e o curso máximo que o equipamento de tracção/compressão permite, pode não ser suficiente (aproximadamente 150 mm).

Encontra-se no Anexo H um artigo referente a esta tese que pretende estar presente na “15.ª Conferência Internacional de Mecânica Experimental” a realizar no Porto entre 22 e 27 de Julho de 2012

5.1 Trabalho futuro

Para trabalho futuro no âmbito da continuação do estudo de comportamento de barreiras de protecção rodoviária (metálica) sugere-se o seguinte:

- Realização de ensaios experimentais para prumos C125 e UPN120, com vista à validação dos resultados numéricos.
- Estudo conjunto da componente barreira longitudinal;
- Estudo do comportamento dos parafusos de ligação;
- Conjugação do comportamento de todos os elementos constituintes de uma barreira de protecção rodoviária metálica;
- Desenvolvimento de estudos dinâmicos, possivelmente através das análises estáticas (equações resultantes por exemplo), que demonstrem o comportamento de toda a estrutura quando sujeita a impacto;
- Desenvolvimento de componentes que possam optimizar o comportamento de todo o sistema de protecção.

BIBLIOGRAFIA

1. **Lawson, John.** *Road Guard.* Estados Unidos da América : s.n., 1923.

2. **Normalização, Comité Europeu de.** *EN 1317 - Road Restraint Systems.*

3. *Cortesia do Doutor José Meireles.*

4. **Cismasiu, Corneliu.** Universidade Nova de Lisboa. [Online] [Cited: Outubro 25, 2011.] http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Elementos_finitos/MEF.pdf.

5. Metalocar. [Online] [Cited: Outubro 17, 2010.] http://www.metalocar.pt.

6. **Padronização, Instituto Alemão de.** *DIN 1026 - Hot Rolled Steel Sections - Dimensions - U Profile.*

7. —. *DIN 10162 - Cold Rolled Steel sections - Dimensions.*

8. [Online] [Cited: Outubro 17, 2011.] http://www.ecocem.ie/img/road_barrier.jpg.

9. [Online] [Cited: Outubro 15, 2011.] http://www.deltabloc.fr/fr/Downloads/attdown/2P2N9Q77mi17/attlang/en.html.

10. **Rodrigues, Jorge and Martins, Paulo.** *Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica.* Lisboa : Escolar Editora, 2005. Vols. I - Fundamentos Teóricos.

11. **Azevedo, Álvaro.** *Método dos Elementos Fintios.* 1ª. s.l. : Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto, 2003.

12. **ANSYS, Inc.** *Workbench - Explicit Dynamics - Training Manual.* 1ª. 2009. Vol. Release 12.0.

13. ANSYS. [Online] [Cited: Setembro 15, 2011.] http://www.ansys.com/About+ANSYS.

14. **ANSYS, Inc.** *Workbench - Mechanical Structural Nonlinearities - Training Manual.* 1ª. 2009. Vol. Release 12.0.

15. **Lee, Huei-Huang.** *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 12.* s.l. : Schroff Development Corporation Publications, 2010.

16. **ANSYS, Inc.** *ANSYS 12.1.* Vol. Release 12.1.

17. **Normalização, Comité Europeu de.** *EN 10025 - Hot Rolled Products of Structural Steels.*

18. —. *EN 10027 - Designation Systems for Steels.*

19. **Qualidade, Instituito Português da.** *NP 1729 - Produtos Siderúrgicos. Aços de Construção de Uso Geral. Definições. Classificação. Características e Condições de Recepção.*

20. **Normalização, Comité Europeu de.** *EN 1461 - Hot Dip Galvanized Coatings on Fabricated Iron and Steel Articles. Specifications and Test Methods.*

21. —. *EN 20898 - Mechanical Properties of Fasteners. Bolts, Screws and Studs.*
22. —. *EN 3740 - Bolts, Shouldered, Thin Hexagonal Head, Close Tolerance Shank, Short Thread, in Titanium Alloy, Anodized, MoS.*
23. **Certificação, Associação Espanholda de Normalização e.** *UNE 135122 - Barreras metálicas de seguridad. Elementos accesorios de las barreras metálicas. Materiales, dimensiones, formas de fabricación y ensayos.*
24. Grupisa. [Online] [Cited: Outubro 2011, 30.] http://www.grupisa.es/index.asp?MP=4&MS=0&MN=1&TR=C&IDR=44.
25. Viapor. [Online] [Cited: Outubro 30, 2011.] http://www.viapor.com.pt/defensa_simples.pdf.
26. **Normalização, Comité Europeu de.** *EN 10279 - Hot Rolled Steel channels - Tolerances on Shape, Dimensions and Mass.*
27. **Certificação, Associação Espanholda de Normalização e.** *UNE 135121 - Barreras metálicas de seguridad para contención de vehículos. Valla de perfil de doble onda. Materiales, geometría, dimensiones y ensayos.*
28. **Estradas, Junta Autónoma das.** *Norma de Traçado JAE P3/94.*
29. Grupisa (adaptado). [Online] [Cited: Outubro 30, 2011.] http://www.grupisa.es/index.asp?MP=4&MS=0&MN=1&TR=C&IDR=44.
30. **Araújo, Gonçalo.** *Estudo Analítico do Tipo de Barreiras de Protecção Rodoviárias.* Universidade do Minho : s.n., 2008.
31. **Normalização, Comité Europeu de.** EN 10025-2:2004 - Hot Rolled Products of Structural Steels - Part 2: Technical Delivery Conditions for Non-Alloy Structural Steels. (adaptado). [Online] [Cited: Outubro 30, 2011.] http://pt.scribd.com/doc/39880280/BS-EN-10025-2-2004.
32. **Qualidade, Instituto Português da.** *NP EN 1317 - Sistemas de Retenção Rodoviária.*
33. **Normalização, Comité Europeu de.** *EN 1317-2:1998 - Road Restraint Systems - Part 2: Perfomance Classes, Impactes Acceptance Criteria and Test Methodos for Safety Barriers.*
34. Metalocar. [Online] [Cited: Outubro 15, 2011.] http://www.metalocar.pt/noticias.php.
35. **Normalização, Comité Europeu de.** *EN 10002-1 - Metallic Materials - Tensile Testing.*
36. —. *EN 10002-1:2001 - Metallic Materials - Tensile Testing (adaptado).*
37. **Engstrand, Klas Erik.** *Improvements to the Weak-Post W-Beam Guardrails.* Worcester Polytechnic Institute : s.n., 2000.

38. *Dynamic Responses of Connections in Road Safety Barriers.* **Bayton, D A F, Long, R and Fourlaris, G.** Março 2009, Materials and Design 30, pp. 635-641.

39. *Analysis of a Safety Barrier Connection Joint Post-Testing.* **Bayton, D A F, Jones, T B and Fourlaris, G.** 2008, Materials and Design 29, pp. 915-921.

40. **Blake, A.** *What Every Engineer Should Know About Threaded Fasteners.* 10ª. Nova Iorque : Marcell Dekker Inc., 1986.

41. *Detailed Modeling of Bolted Joints With Slippage.* **Reid, John D and Hiser, Nicholas R.** 2005, Finite Elements in Analysis and Design 41, pp. 547-562.

42. *Dynamic Characteristics of Scaled-Down W-Beams Under Impact.* **Hui, T Y J, Ruan, H H and Yu, T X.** 2003, International Journal of Automotive Technology, No. 1, Vol. 4, pp. 31-40.

43. *Large Plastic Deformation of W-Beams Used as Guardrails on Highways.* **Hui, S K and Yu, T X.** Suiça : s.n., 2000, Key Engineering Materials, Vols. 177-180, pp. 751-756.

44. **Lima, Hugo Miguel Parente.** *Comportamento Funcional e Estrutural das Barreiras de Segurança.* Universidade do Porto : s.n., 2006.

45. **Davim, J P and Magalhães, A G.** *Ensaios Mecânicos e Tecnológicos.* s.l. : Estante Editora, 1992.

46. **Silva, Lucas, Duarte, Teresa and Antunes, Viriato.** *Problemas e Trabalho Práticos de Metalurgia.* s.l. : FEUP Edições, 2008.

47. **Branco, Carlos Moura.** *Mecânica dos Materiais.* 2ª. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 1994.

48. **Boyer, H.** *Atlas of Stress-Strain Curves.* 2ª. Materials Park : ASM International, 1990.

49. **Moaveni, Saeed.** *Finite Element Analysis - Theory and Application with ANSYS.* 2ª. s.l. : Prentice Hall, 2003.

50. Ferpinta. [Online] [Cited: Outubro 30, 2011.] http://www.ferpinta.pt/index.php?cat=26&PHPSESSID=808306d40af60cbcfd4e95a28f4ecded.

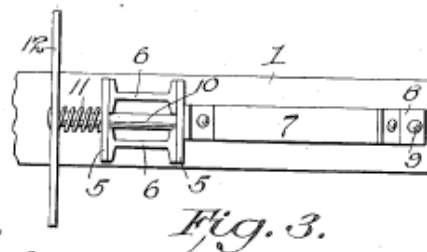
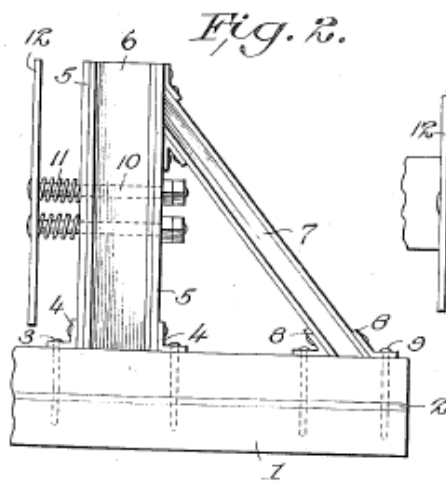
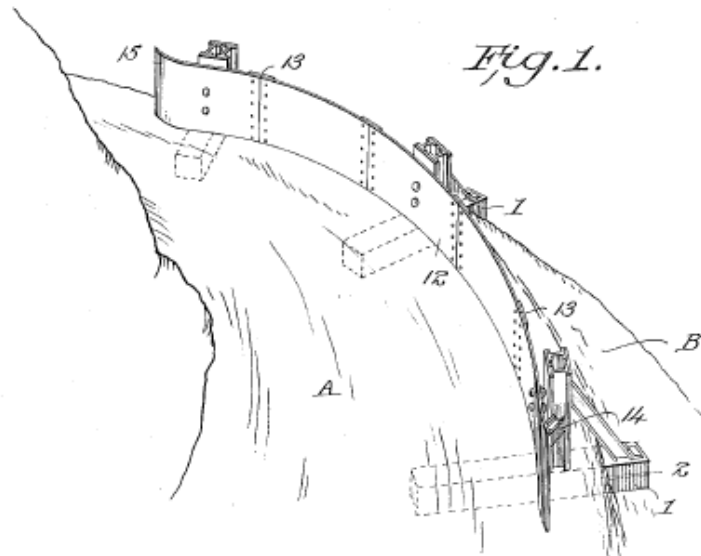
51. **Timoshenko, Stephen P.** *Resistência dos Materiais.* Rio de Janeiro : Livros Técnicos Científicos Editora S.A., 1975. Vol. II.

52. **ANSYS, Inc.** *Workbench - Mechanical Structural Nonlinearities - Workshop Supplement.* 1ª. 2009. Vol. Release 12.0.

53. **Normalização, Comité Europeu de.** *EN 1317-1:1998 - Road Restraint Systems - Part 1: Terminology and General Criteria for Test Methods.*

ANEXOS

Anexo A – Patente de J.A. Lawson

Mar. 27, 1923.
J. A. LAWSON
ROAD GUARD
Filed Feb. 9, 1922
1,449,518
Fig. 1.
Fig. 2.
Fig. 3.
Inventor
John A. Lawson,
Cubberley & Kessenich.
Attorney

Patented Mar. 27, 1923. 1,449,518

UNITED STATES PATENT OFFICE.

JOHN A. LAWSON, OF WEST HAVEN, CONNECTICUT.

ROAD GUARD.

Application filed February 9, 1922. Serial No. 535,323.

To all whom it may concern:

Be it known that I, JOHN A. LAWSON, a citizen of the United States, residing at West Haven, in the county of New Haven 5 and State of Connecticut, have invented certain new and useful Improvements in Road Guards, of which the following is a specification.

My invention relates broadly to improve- 10 ments in guard or safety devices for roads, bridgeheads, and the like, whereby to prevent vehicles from leaving a defined path of travel. More specifically my invention contemplates the provision of a cushioned guard 15 member formed with a plurality of plates arranged to present a continuous surface, and retained in position by improved supports particularly adapted for positioning the guard along the exposed edge of a road 20 bordering an abrupt declivity, such as is presented by the face of a cliff or the side of a mountain.

Safety devices heretofore known and used, such as fences and guard rails, have 25 proved ineffectual on account of inapt construction or inherent fragility, and cement or stone walls are usually too expensive for general purposes. My invention, as distinguished from these, affords a positive, cush- 30 ioned guard which is readily adaptable to the particular curvature of the road or the approach to bridgeheads, and which presents a continuous wall like surface through which no vehicle could pass. Furthermore, 35 the supports and the guard per se are formed of parts which are simple, few in number, and which may be replaced with facility when they become worn or broken.

To the foregoing advantages and func- 40 tions may be added: first, the particular adaptability of my guard surface for the reception of advertising matter and road signs; second, the arrangement of the guard with respect to a road bed which primarily 45 eliminates the use of a gutter and dome crown; third, the interpolation of spring elements between the guard plates and supports which prevents excessive shock both to a vehicle and to the guard; and, fourth, 50 the arrangement and construction of the parts comprising the supports which facilitates setting up the guard and renewing those parts which might become broken or worn.

55 The particular elements of my guard device employed to accomplish the above and other equally important objects will be hereinafter more fully described in detail and specifically pointed out in the claims appended hereunto and forming a part of this 60 specification.

In the accompanying drawings wherein is illustrated the preferred embodiment of my invention:—

Figure 1, is a perspective view showing 65 my guard applied to a road encircling a cliff,

Figure 2, is a side view of one guard element including a support, and

Figure 3, is a top plan view of an element 70 including a portion of a guard plate and a support.

Like characters of reference refer to like or similar parts throughout the several views of the drawings, in which:— 75

(A) designates a road bed constructed preferably without crown or outside gutter and (B) the exposed edge of the road which in the present instance is shown to be the face of a cliff. Embedded a considerable 80 distance beneath the surface of the road, and, in the present instance, extending outwardly from the face of the cliff (B) are a plurality of elongated cement blocks (1) each formed with a central plate iron rein- 85 forcing member (2). Attached to each of the blocks (1) by bolts (3) extending through the members (2), are a pair of brackets (4), to which are secured by rivets the ends of vertical plates (5). The plates 90 (5) rise through the road bed and have arranged therebetween a pair of spaced I-beams (6). The plates (5) and the I-beams (6) form an upright standard which is supported by an inclined I-beam (7) the lower 95 end of which is riveted to brackets (8), which in turn are bolted as at (9) to the block (1). The upper end of the beam (7) is riveted to one of the plates (5) as shown in Figure 3. The plates (5) may be either welded to 100 the beams (6) as shown or riveted or bolted thereto. In the present instance the inclined supporting beams (7) rise to the standards from the exposed ends of the blocks (1) but if the road is one not encircling a cliff or 105 other abrupt declivity, the beams (1) are embedded completely in the ground.

Extending through the plates (5) midway their ends, and between the I-beams (6) are a pair of large bolts (10) each carrying a 110 coil spring (11). Between the coil springs (11) and the headed ends of the bolts (10)

are arranged plates (12) which form the guard per se. The plates (12) are positioned about six inches from the ground or surface of the road and extend upwardly flush with the tops of the standards. The dimensions of the plate may be of any size although preferably rectangular. Adjoining plates are riveted to a strip (13) so that in effect the plates form a continuous wall which may be shaped to conform to the curvature of the road. The end plates are braced in any suitable manner by the support (14).

In assembling the guard formed by the plates upon the standards, the bolts (10) are passed through the plates and the coil springs (11) disposed thereon, whereupon they are passed through the standards and the nuts applied. It will be seen that impact upon the guard will be compensated by the coil springs (11) thus materially lessening shocks both to a vehicle and to the guard and supports.

In the present embodiment the ends of the guard are bent back as at (15) to prevent accidental contact with an approaching vehicle, and the general curved conformation of the guard is simply shown by way of illustration, as it may well be straight or otherwise curved to conform to the particular nature of the road where used.

The surface of the guard may be utilized for advertising matter (not shown) or it may be painted a distinctive color, such as white, to acquaint an approaching vehicle at night with the proximity of a dangerous curve.

While in the foregoing there has been illustrated and described such combination and arrangement of elements as constitute the preferred embodiment of my invention, it is nevertheless desired to emphasize the fact that interpretation of the invention should only be conclusive when made in the light of the subjoined claims.

Having described my invention and its objects with such attention to detail as will thoroughly acquaint one skilled in the art with its construction and advantages, I claim:—

1. A device of the type described comprising longitudinal base members, vertical supporting members each engaging one of the base members, braces for retaining the supporting members upon the base members, a guard member, and means for resiliently connecting the guard member with the supporting members.

2. A device of the type described comprising longitudinal base members, a pair of vertical plates secured to the base members, beams arranged between the plates, a brace for the plates, bolts carried by the plates and extending between the beams, a guard member carried by the bolts, and coil springs interpolated between the guard member and the adjacent plates.

3. A device of the type described comprising a guard formed with curved end portions, supporting standards for the guard, means loosely engaging the guard and the standards for retaining the guard thereon, and resilient means arranged upon the aforementioned means and directly engaging the standards and guard for exerting sustained pressure upon the guard.

4. A device of the type described comprising a guard, supporting standards for the guard, a plurality of loosely mounted bolts carried by the standards, and the guard being loosely mounted on the bolts and limited in movement in one direction by the heads of the bolts, and resilient means directly engaging the standards and the guard for exerting sustained pressure upon the guard.

5. A device of the type described comprising a guard, a plurality of supporting standards for the guard, each formed with front and back plates, and spaced I-beams forming side plates, and a plurality of retaining members loosely carried by the aforementioned plates and arranged between the said I-beams for attaching the guard to the standards, said retaining members being arranged in pairs for the purpose defined.

6. A device of the type described comprising a guard formed with backwardly curved end portions, supporting standards for the guard, a plurality of bolts loosely carried by the standards, the guard being loosely mounted on the bolts and normally resting against the heads thereof, and a coil spring carried by each of the bolts and bearing directly against the standards and the guard for exerting a sustained pressure upon the guard.

In testimony whereof I affix my signature hereto.

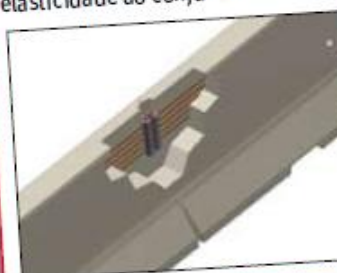
JOHN A. LAWSON

Anexo B – Notícia Autohoje de Maio de 2011

Portugal evita aplicar norma europeia

A LEI IMPÕE A MONTAGEM DE SEPARADORES ELÁSTICOS PARA ESTRADAS NOVAS. SE A MEDIDA, TODAVIA, SE APLICASSE TAMBÉM ÀS VIAS ACTUAIS, O ACIDENTE DA SEMANA PASSADA COM UM PESADO NA VCI TERIA SIDO MENOS GRAVE.

O aparatoso acidente da semana passada na VCI, Porto, no qual um pesado se despistou e abalroou carros que circulavam em sentido contrário, podia ter tido menores consequências humanas e materiais se os separadores de betão fossem os que Bruxelas exige na norma EN 1317-5:2007+A1:2008, desde Janeiro deste ano. Embora a norma se aplique a vias novas, os especialistas em construção de estradas defendem a gradual substituição dos separadores de betão da maioria das estradas por outros do tipo Delta Bloc, cuja capacidade de retenção dos veículos é superior. Alexandre Machado, da empresa Betafiel, esclarece que a grande vantagem dos novos separadores, aplicado em Portugal em 5 km no IP3 e numa extensão de 600 metros da futura auto-estrada transmontana, está em terem uma composição elástica (a absorção da energia de um impacto de um veículo é mais eficiente) e não se despedaçarem, ao invés do que ocorre com os tradicionais blocos de betão. Isto faz com que o risco e a gravidade de ferimentos se reduzam, pois é minorada a probabilidade de haver intrusão de partes que se tenham soltado do separador. "Quando se dá o embate, a estrutura funciona como um corpo elástico que absorve grande parte da energia. O veículo é reencaminhado ao longo da barreira e para a sua faixa de rodagem, conseguindo-se que não transponha a faixa de rodagem e evita-se a projecção de pedaços de betão", refere Alexandre Machado.

Este sistema já é aplicado na Áustria, Alemanha, Dinamarca, França e Holanda há quase uma década. Embora mais seguro, é 60 a 70% mais caro que um separador tradicional, um entrave à sua generalização

Anexo C – Certificado LIER da Metalocardoso

Laboratoire d'essais Inrets Equipements de la Route
Inrets Road Equipement Test Laboratory

ATTESTATION D'ESSAI

Par ce document, notre société atteste avoir procédé à l'essai ci-après décrit, dans les conditions exposées, à savoir :

Normes de référence :	*EN 1317-1 et 2*
Test :	*TB32*
Date d'exécution :	*10/02/05*
N° interne d'identification :	*MCA/GME-02/894*
Nom du dispositif :	*Glissière de sécurité type A - METALOCARDOSO*
Véhicule utilisé :	*BMW 528i*
Masse opérationnelle :	*1 436 kg*
Angle d'impact :	*20,0 °*
Vitesse d'impact :	*112,6 km/h*
ASI :	0,5
THIV :	*19 km/h*
PHD :	***19 g***
Boîte CEN :	***OK***

pour le compte de la société dont la dénomination sociale et l'adresse sont les suivantes :

METALOCARDOSO S.A.
Eira Nova - Fregim
Apartado 55
4600-596 AMARANTE (Portugal)

La présente attestation est établie dans l'attente de l'édition du rapport d'essai que nous devons établir et lui faire parvenir.

Pour valoir et servir ce que de droit.

A Lyon St Exupéry, France, le 14.02.2005

Martin PAGE
Directeur Technique

Adresse postale : D 29 - Route de Crémieu
BP 352 - 69125 Lyon Saint Exupéry Aéroport
Tél. 04 72 48 37 30 - Fax 04 72 48 37 37
N° SIRET 393 968 796 00019

S.A. au Capital de 125.000 €
Siège Social : D 29 - Route de Crémieu
69124 Colombier Saugnieu
RCS LYON 393 968 796 - Code APE 743 B

Anexo D – Manual básico de ANSYS

Manual de instrução para a execução de análise estática no ANSYS, incluindo plasticidade e inserção de material próprio.

O primeiro passo refere-se à inserção da curva de tensão-deformação verdadeira retirada através de funções logarítmicas e por medição da variação da secção do provete em análise enquanto decorre o ensaio, indispensável na descrição da curva após atingir a tensão de rotura. Este ajustamento deve ser efectuado apenas para o domínio plástico.

Para tal durante a zona de deformação plástica uniforme, da tensão de cedência até à tensão de rotura, deve utilizar as equações (D.1) para o cálculo da tensão e a (D.2) para o cálculo da extensão.

$$\sigma_v = \sigma_e \cdot (1 + \varepsilon_e) \tag{D.1}$$

Em que:

σ_v = tensão verdadeira (MPa);

σ_{eng} = tensão da curva engenharia (MPa);

ε_{eng} = extensão da curva de engenharia.

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_e) \tag{D.2}$$

Em que:

ε_v = extensão verdadeira;

ε_{eng} = extensão da curva de engenharia.

Após a tensão de rotura, deve efectuar o cálculo da tensão e extensão a cada instante através das equações (D.3) e (D.4) até à fractura do provete.

$$\sigma_v = \frac{F}{A} \tag{D.3}$$

Em que:

F = força exercida no provete, em cada instante (N);

A = área da secção do provete, em cada instante (mm^2).

$$\varepsilon_v = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \tag{D.4}$$

Em que:

A_0 = área da secção do provete inicial (mm^2);

A = área da secção do provete, em cada instante (mm^2).

Após este ponto, e consoante o tipo de provete que ensaiado deve rever os critérios de cálculo da tensão na zona de estricção do provete.

Por fim, antes da inserção do material no programa, deverá efectuar a subtracção da extensão elástica em cada ponto da extensão total calculada através das equações em cima de modo a obter apenas os valores de deformação plástica. Para tal deverá utilizar a equação (D.5).

$$\varepsilon_{Pl} = \varepsilon_T - \varepsilon_{El} \tag{D.5}$$

Em que:

ε_{Pl} = extensão plástica;

ε_T = extensão total;

ε_{El} = extensão elástica.

Em seguida deve abrir o programa *ANSYS Workbench*. Para a execução de uma análise estática única, deverá escolher a opção "*Static Structural* (*ANSYS*)" em "*Analysis Systems*", na "*Toolbox*" à esquerda (Figura D.1). Neste componente poderá inserir, desenhar e analisar o mesmo material, através das suas diferentes opções.

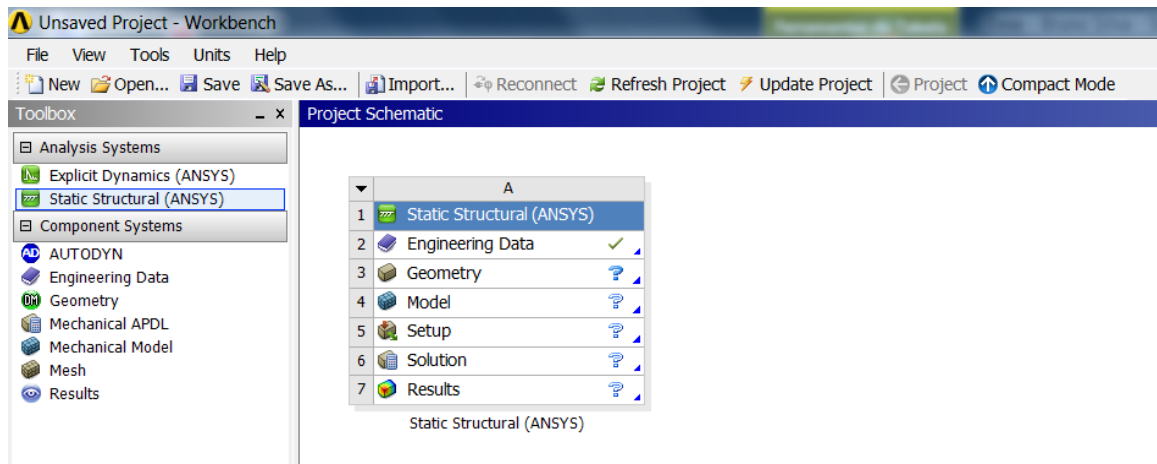



Figura D.1 – Componente de análise *Static Structural* e suas opções.

Contudo pode escolher componentes individualmente para o caso de querer utilizar o mesmo material, ou a mesma geometria para diferentes análises Figura D.2.

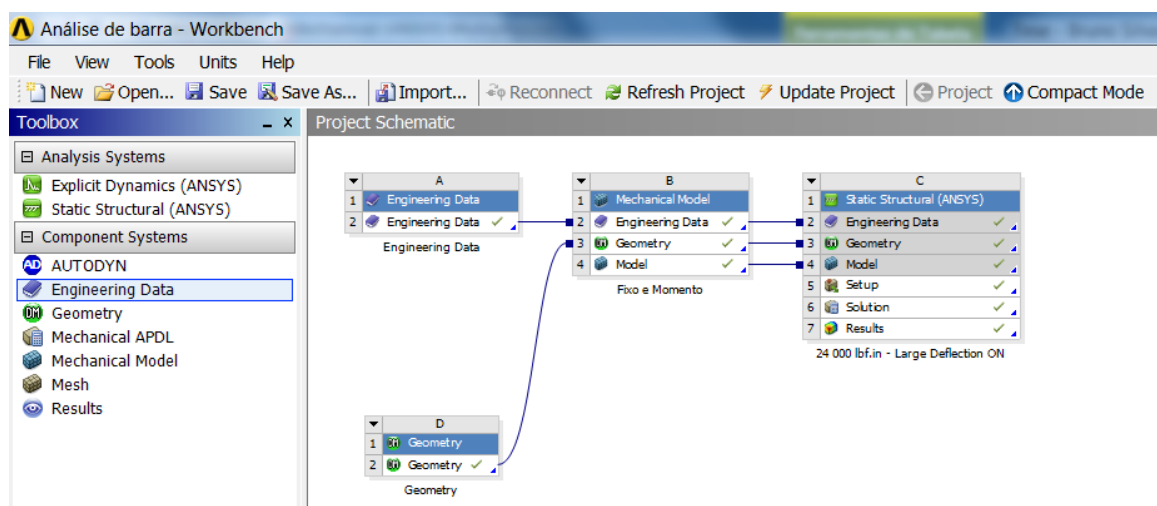



Figura D.2 – Análise por componentes, com esquema maior, para a inserção de várias análises.

De modo a facilitar o entendimento deste manual, tenha como componente descrita na Figura D.1. Em seguida deverá inserir o material que pretende analisar através do módulo "*Engineering Data*" (Figura D.1). Nesta opção tem à disposição todas características presentes na Figura D.3.

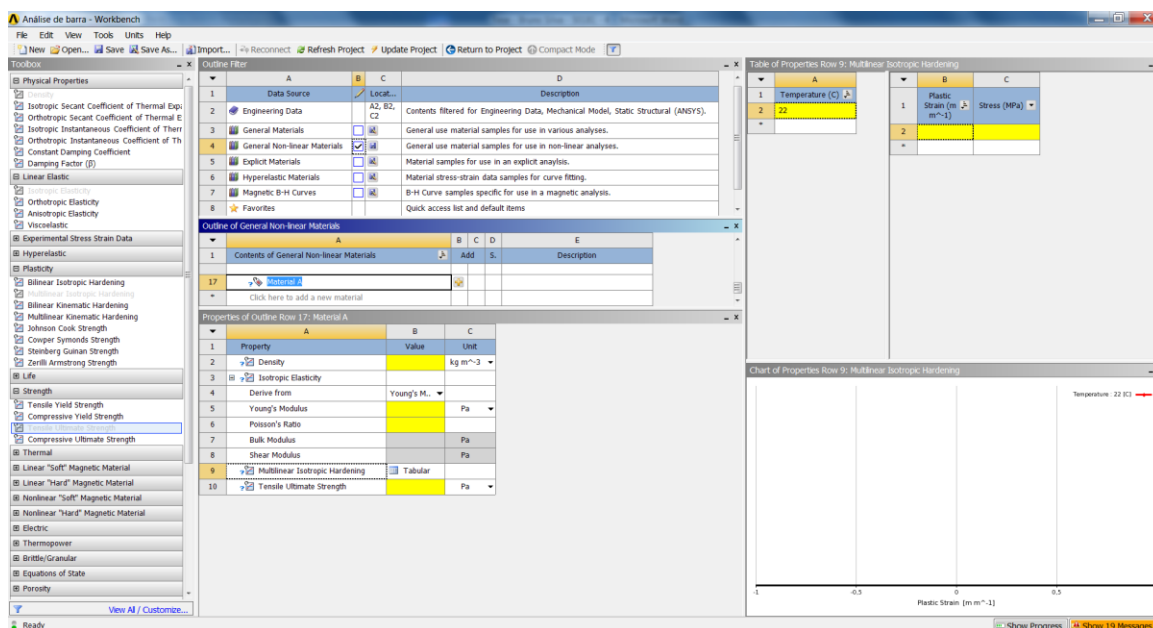



Figura D.3 – Esquema da opção “*Engineering Data*” para inserção das características do material.

Inicialmente tem que colocar o visto à frente da livraria de materiais que quer adicionar na janela “*Outline Filter*”, neste caso foi a livraria “*General Non-linear Materials*”.

De seguida em baixo desta tem a janela “*Outline of General Non-linear Materials*”, onde pode dar o nome ao seu material escrevendo na linha “*Click here to add a new material*”.

Aqui pode inserir as características com que pretende descrever o material, presentes na “*Toolbox*” à esquerda. Neste caso foram inseridas as seguintes características:

- *Density* (Massa volúmica);
- *Isotropic Elasticity*, onde pode inserir o módulo de *Young* e o coeficiente de *Poisson*;
- *Tensile Ultimate Strength*, (tensão de rotura do material);
- *Multilinear Isotropic Hardening*.

Em todas elas deve ter cuidado ao escolher a unidade correcta do valor que pretende inserir.

Para a completa descrição deste material deverá finalmente inserir os valores de tensão e extensão da curva verdadeira através da opção *Multilinear Isotropic Hardening* que permite a

inserção, em cima à esquerda, na janela "*Table of Properties Raw x: Multilinear Isotropic Hardening*". Inicialmente deve escolher a temperatura a que foi efectuado o ensaio para que possa em seguida inserir os valores de extensão e tensão respectivamente, sendo que o primeiro ponto deve representar apenas a extensão plástica (zero) e a tensão de cedência. O último ponto representa a fractura e extensão à fractura.

Em seguida deve retirar o visto abordado em cima, da livraria do seu material, e escolher a opção "Sim" à questão que lhe será colocada, relativa à gravação do seu material na livraria.

Para terminar deve seleccionar o ícone "+" na janela "*Outline of General Non-linear Materials*" ao centro, de modo a adicionar o seu material à análise que irá efectuar. Em seguida seleccione o ícone "*Return to Project*" em cima.

Em seguida deverá escolher a opção "*Geometry*" (Figura D.1), que abrirá o módulo "*DesignModeler*".

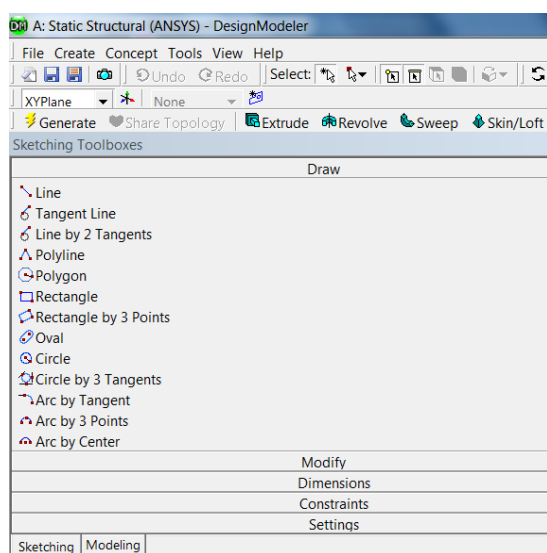
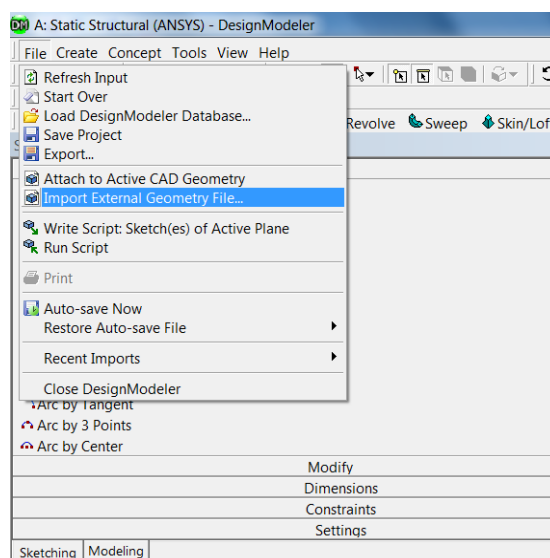
Aqui poderá desenhar a estrutura através da opção "*Sketching*", de modo a iniciar o desenho Figura D.4 a, ou poderá importar a peça desenhada noutro programa Figura D.4 b.

a) b)

Figura D.4 – Opção "*Geometry*". a) "*Sketching*". b) Importar modelo noutro formato.

De qualquer das formas, após a importação ou desenho da peça deverá seleccionar o ícone "*Generate*" (Figura D.4 a). Em seguida feche a janela.

De volta ao esquema da Figura D.1 seleccione a opção "*Model*" onde que abrirá o módulo "*Mechanical*" onde poderá configura a malha, as cargas e o tipo de resultados que pretende obter, ou seja, é neste módulo que obtém os resultados (Figura D.5).

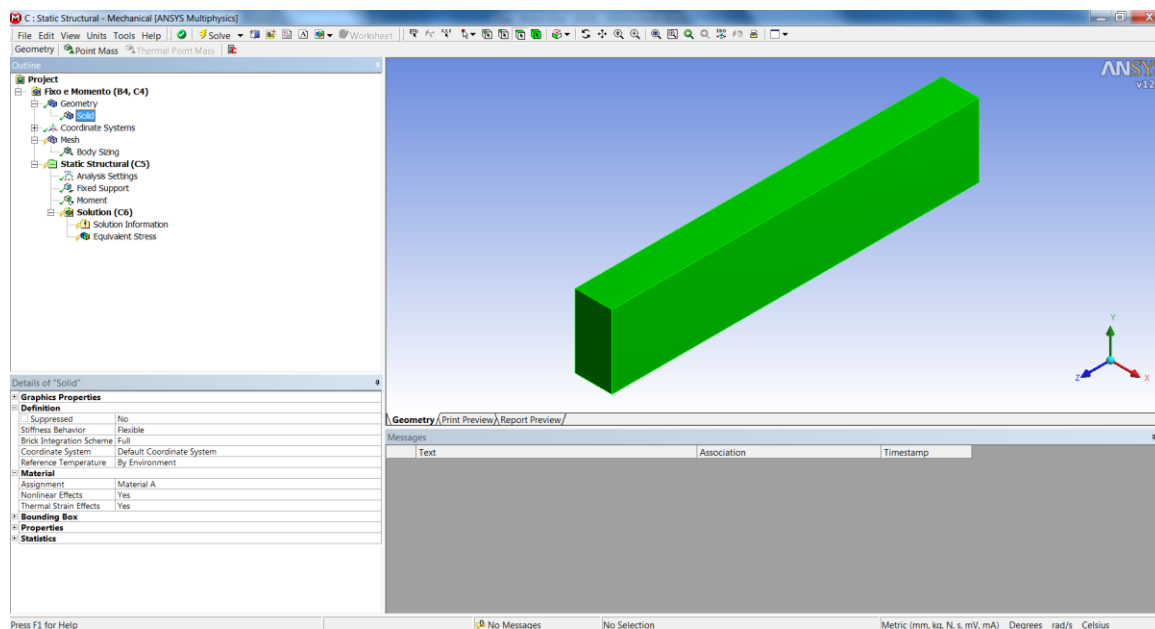



Figura D.5 – Ambiente gráfico do *Mechanical*.

Para uma análise com mais pontos de análise por elemento, mas também mais demorada deve escolher a opção "Manual" na Figura D.6, dentro do menu "*Geometry*"

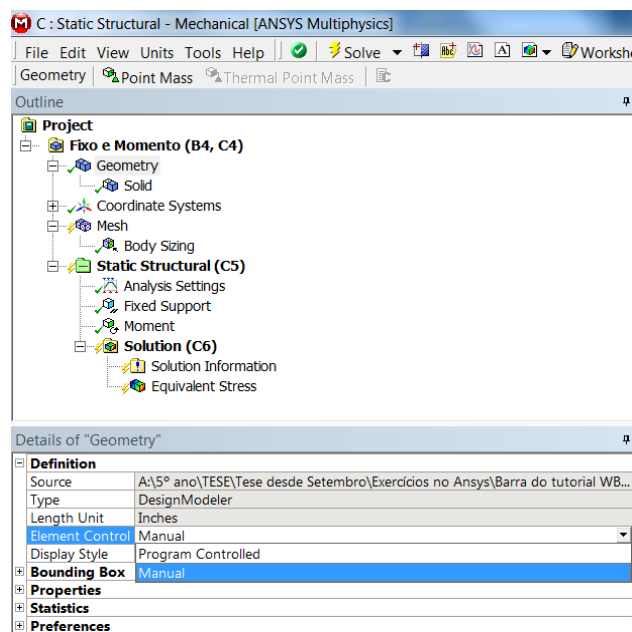



Figura D.6 – Opção de escolha automática ou manual da forma de integração.

Em seguida no submenu "*Solid*" (Figura D.7) deverá escolher a opção "*Full*" em "*Brick Integration Scheme*". Para a selecção do material da estrutura deve escolher os materiais que tem à disposição "*Engineering Data*" para esta análise como pode ver na Figura D.7.

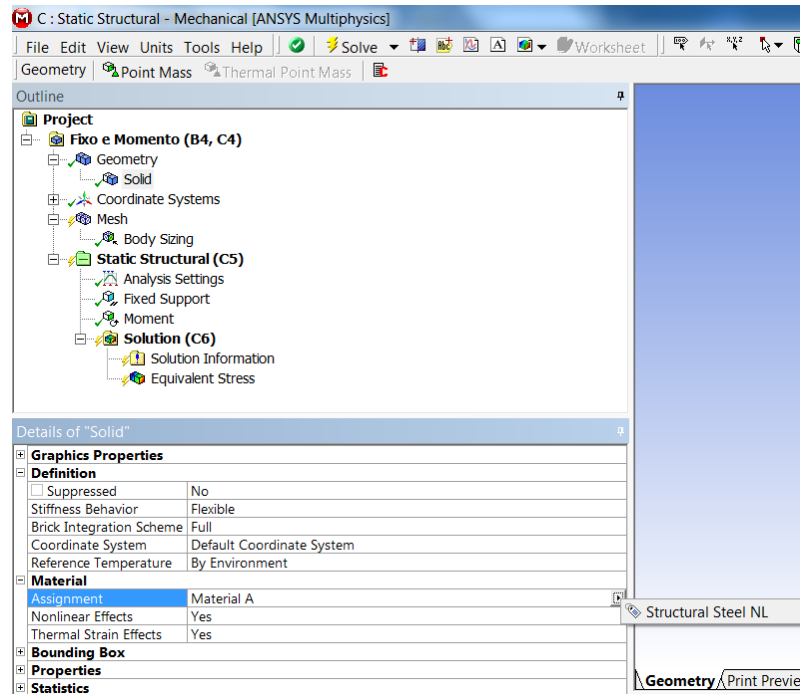



Figura D.7 – Escolha do material.

Se as geometrias introduzidas estiverem ou entrarem em contacto aparecerá mais uma opção, o menu "*Connections*" (Figura D.8). Caso não tenha contactos na análise avance até à configuração de malha.

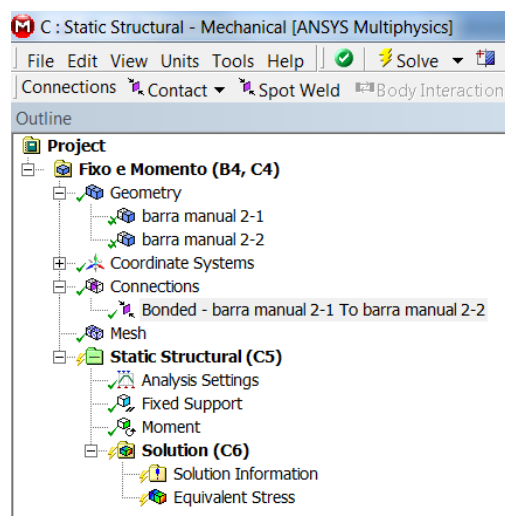



Figura D.8 – Menu "*Connections*".

Dentro deste estão descritas os contactos, que também podem ser introduzidos manualmente. Existem cinco tipos de contactos "*Bonded*" (ligados), "*No Separation*" (sem separação), "*Frictionless*" (sem fricção), "*Rough*" (contacto forte, tipo choque) e "*Frictional*" (com fricção) ao qual será necessário introduzir o valor da fricção entre superfícies (Figura D.9).

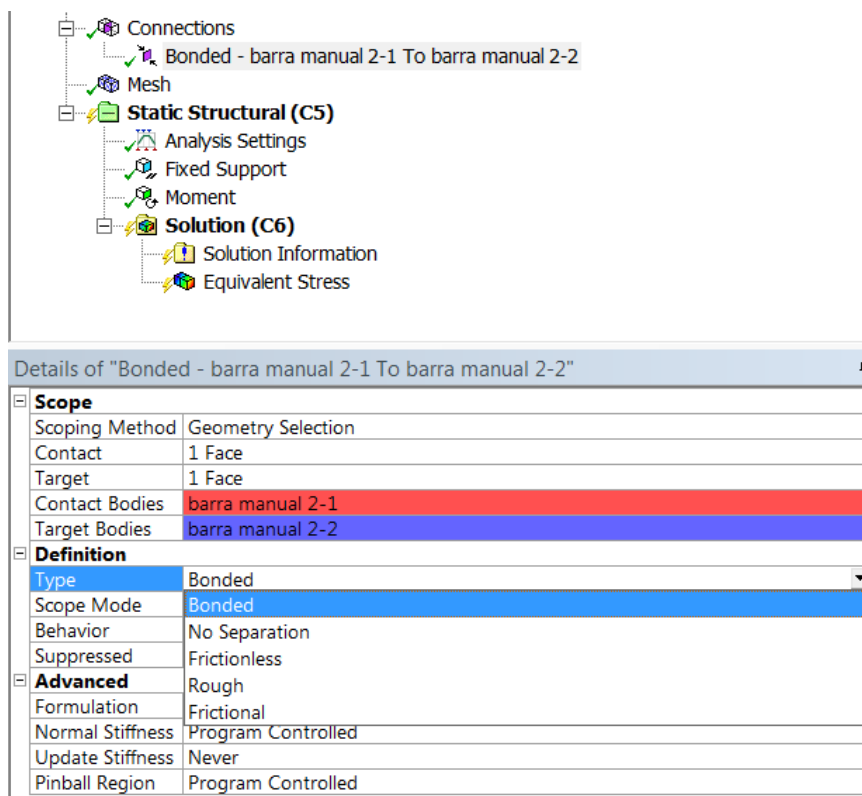



Figura D.9 – Opções de descrição de contacto.

Existem ainda diferentes tipos de formulação de análise do contacto que se podem escolher na opção "*Formulation*" dentro da descrição do contacto (Figura D.10).

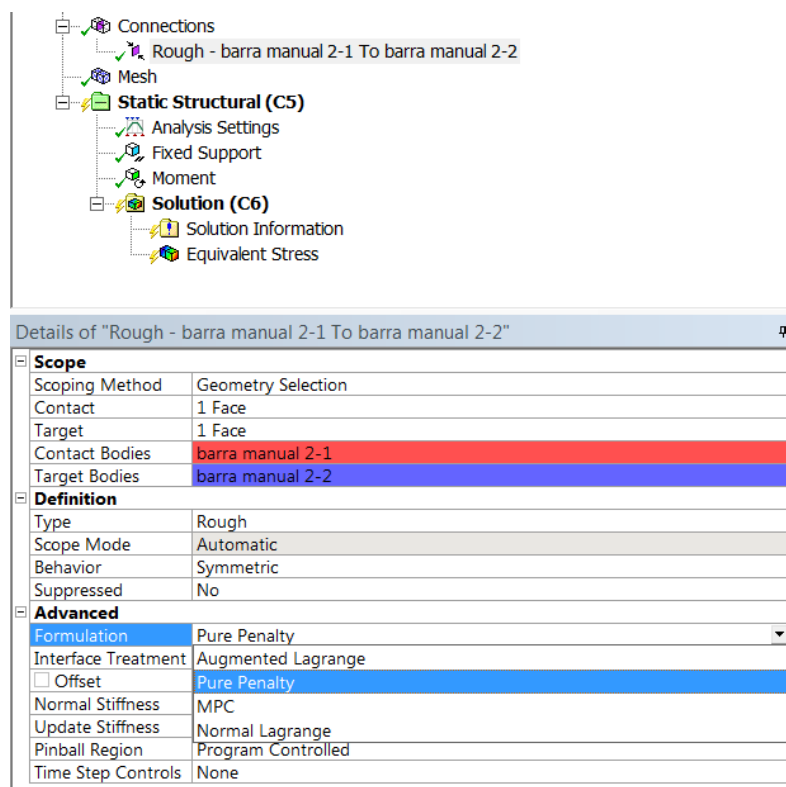



Figura D.10 – Formulação de análise do contacto.

Contudo, se a sua peça for única, não apresentar contactos, deve voltar à configuração da simulação através da configuração da malha.

Dentro do menu "*Mesh*" (malha) pode escolher as opções na Figura D.11 em baixo ou inserir outro tipo de opções para dimensionar os elementos da malha em "*Sizing*", ou ainda escolher o tipo de elementos que quer na malha com a escolha da opção "*Method*"

Com as opções presentes na Figura D.11 em baixo pode escolher o tipo de refinamento de malha em "*Relevance Centre*" com três hipóteses distintas, "*Coarse*" (grosseira), "*Medium*" (média), "Fine" (fina). Dentro de cada uma destas ainda pode escolher refinar de 0 a 100 em "*Relevance*".

Na opção "*Statistics*" pode verificar o número de nós e elementos da estrutura.

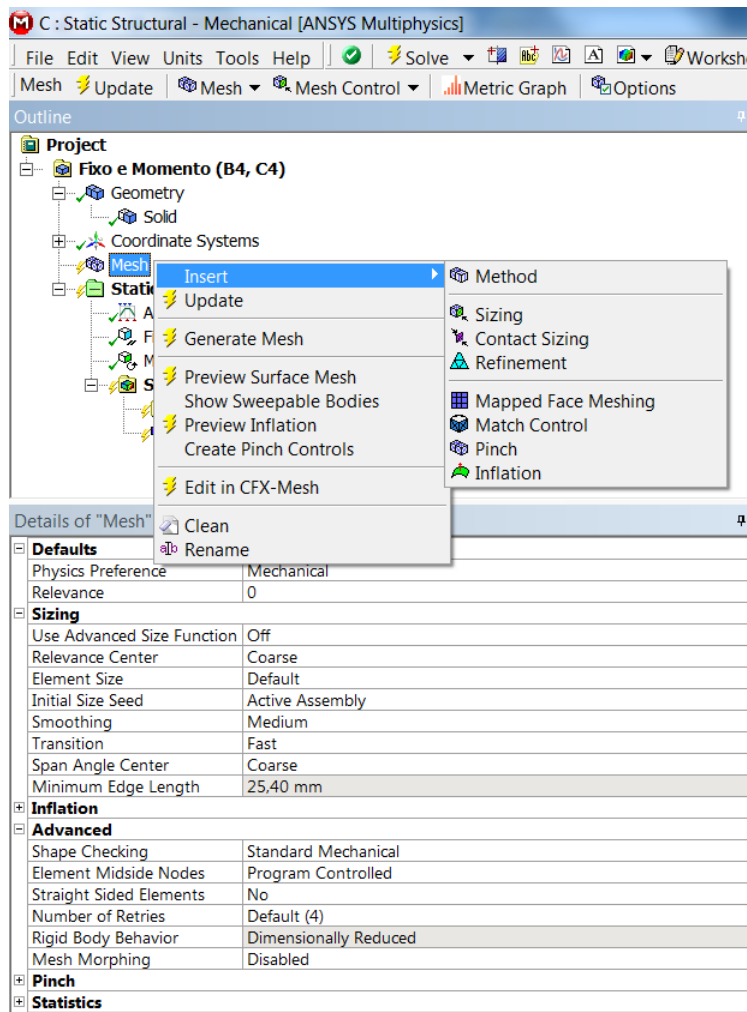



Figura D.11 – Opções do menu "*Mesh*".

Com a inserção do submenu "*Method*" é possível alterar o tipo de elementos da malha da estrutura com a opção "*Method*" na Figura D.12 em baixo. Aí é possível escolher entre tetraedros, hexaedros, entre outros, como pode verificar na Figura D.12.

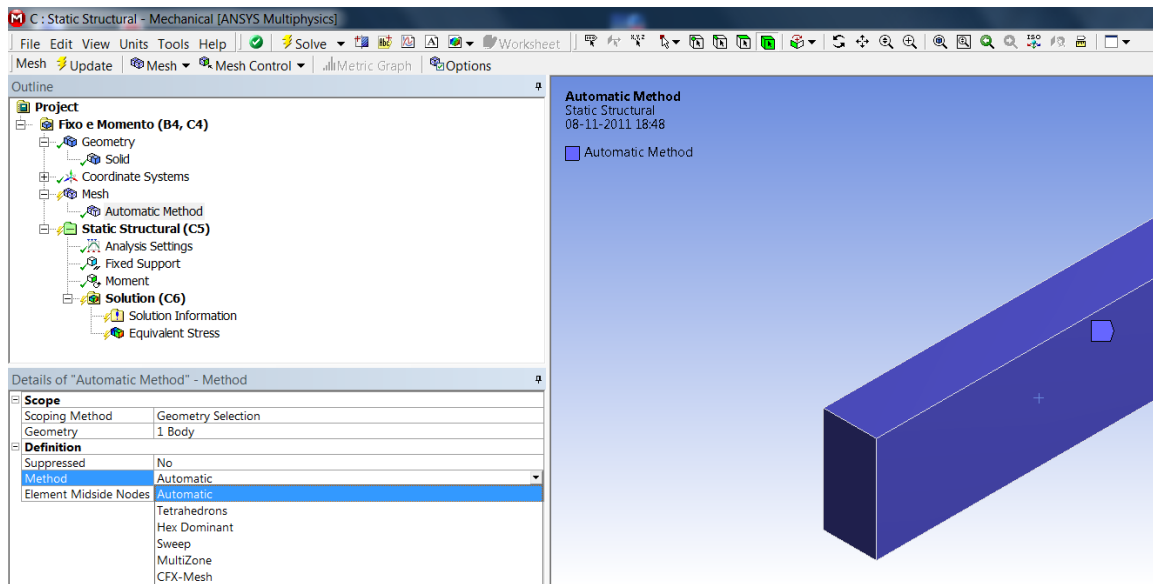



Figura D.12 – Submenu “*Method*”.

Nesta mesma figura, aquando da selecção da estrutura para escolher o tipo de elementos, basta seleccionar a mesma.

Contudo, se precisar para outros motivos de seleccionar apenas pontos, arestas ou faces, deve seleccionar de entre os ícones presentes na Figura D.13, que apresentam um seta e respectivas selecções.

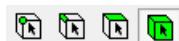



Figura D.13 – Ícone para a escolha de diferentes formatos de selecção.

Em seguida avance para a configuração das cargas e suportes a aplicar, como pode verificar na Figura D.14. É possível aplicar forças, pressões, momentos, suportes, restrições, entre outros. Na aplicação de momentos, por exemplo, deverá inserir o valor do momento no eixo de rotação do mesmo.

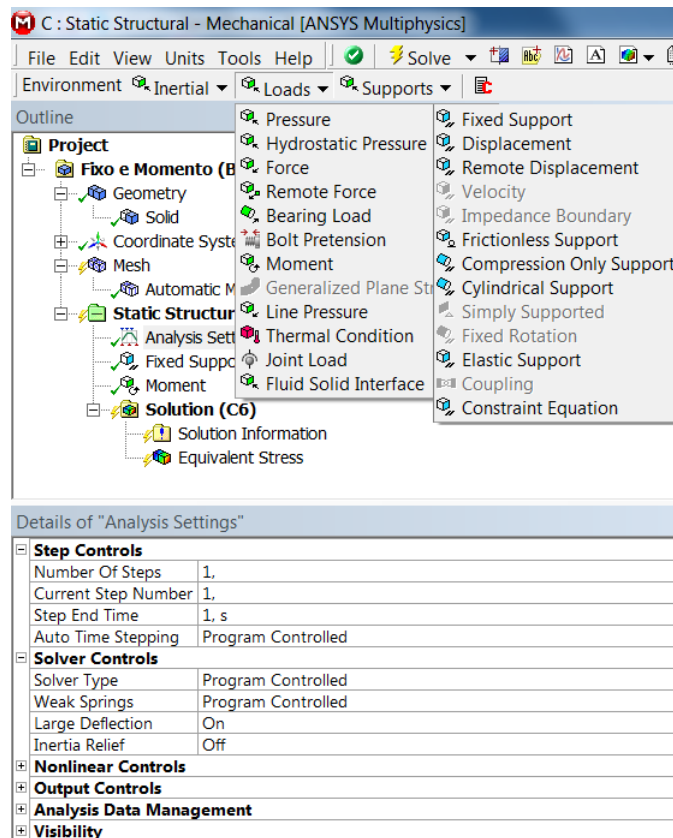



Figura D.14 – Menu “*Analysis Settings*” para a inserção de restrições e cargas.

Dentro do menu “*Analysis Settings*” é pode escolher a opção “*Large Deflection*” como “*On*” para o caso de pretender uma deformação realista da estrutura (Figura D.14). Nesse caso serão feitos ajustamentos à matriz de rigidez da estrutura para ter em conta as variações de geometria durante a análise. É mais indicada para casos que incluem deformação plástica ou comportamento não linear.

Ao seleccionar as faces de aplicação das cargas, poderá seleccionar mais do que uma face utilizando a tecla “Ctrl”.

Na Figura D.15 pode verificar todo o tipo de soluções que pode obter resultante de toda a configuração feita até então.

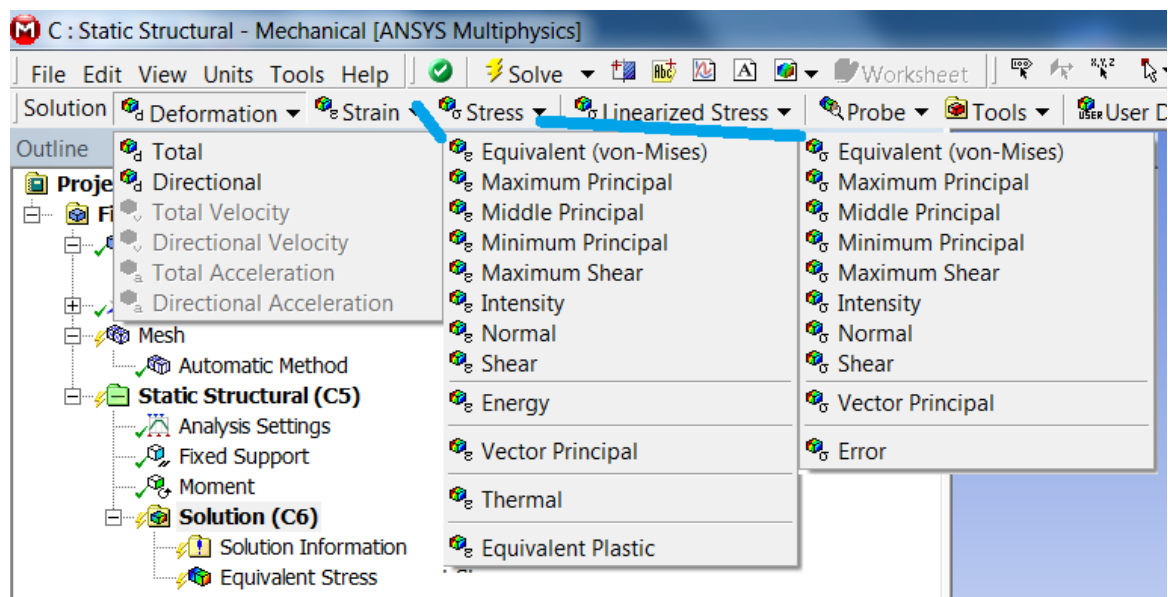



Figura D.15 – Opções de solução do menu "*Solution*".

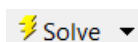
Por fim terá de seleccionar o ícone "*Solve*" (Figura D.16) de modo a iniciar análise por parte do programa.

Solve

Figura D.16 – Ícone Solve.

Por fim pode verificar relatórios dos passos efectuados pelo programa, tanto a nível de texto como a nível gráfico através do menu “*Solution Information*” opção “*Solution Output*” (Figura D.17).

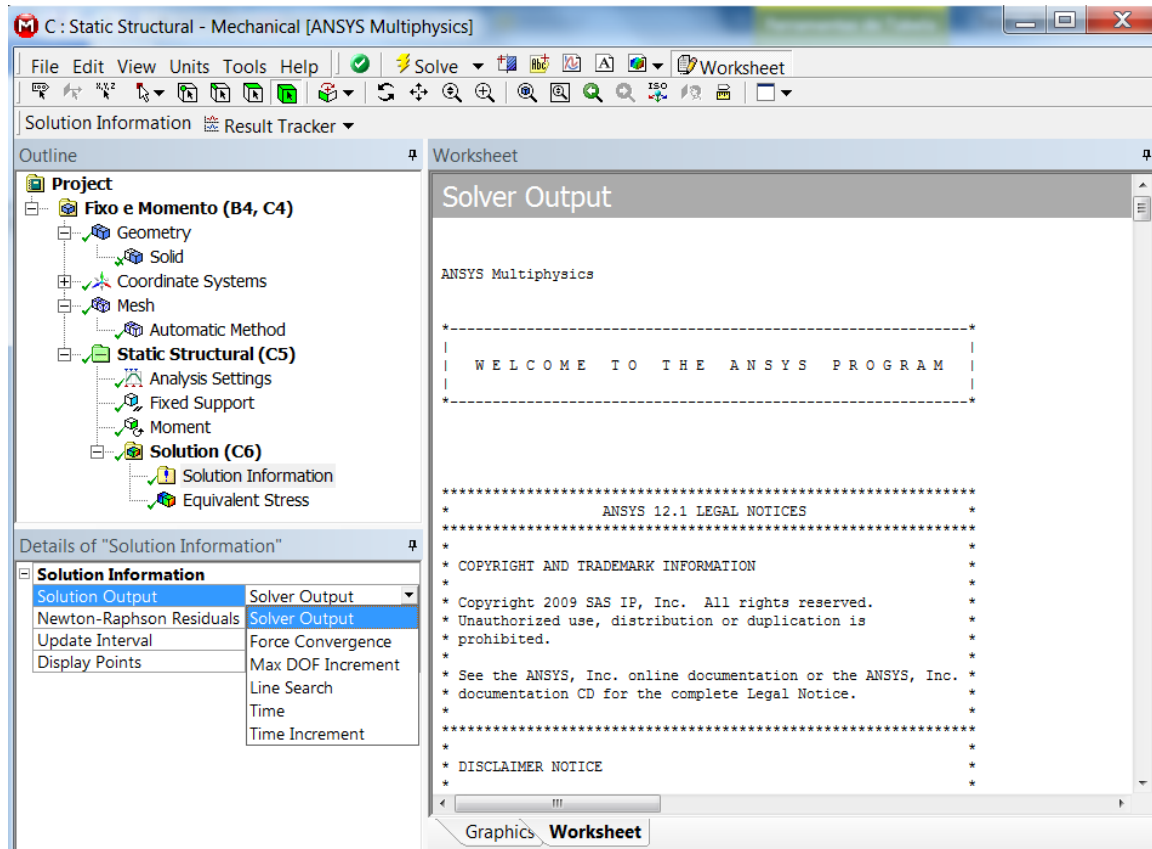



Figura D.17 – Opções do “*Solution Output*”.

Na opção “*Solver Output*” pode verificar a lista de passos efectuados pelo programa e algumas decisões tomadas. Poderá verificar aqui o tipo de elemento específico utilizado.

Chegado aqui tem toda a informação necessária à execução de uma análise estática na vertente “*Workbench*”, para uma estrutura única.

Pode contudo em seguida conjugar a informação retirada desta vertente gráfica do ANSYS, o “*Workbench*”, para a vertente de comandos, o “*Mechanical ADPL*”. Para tal é necessário obter o ficheiro de dados da análise feita neste ambiente, através da opção “*Write Input File*” presente na Figura D.18.

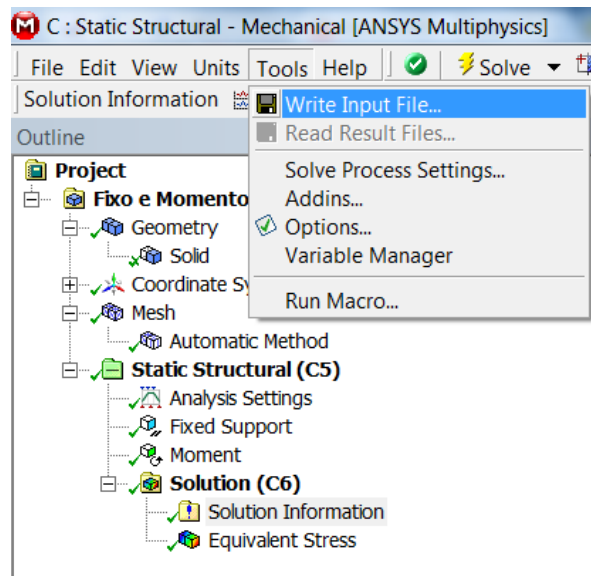



Figura D.18 – Opção “*Write Input File*”.

Se quiser então verificar ou obter algumas listagens que a vertente “*Workbench*” não proporciona, deverá então abrir a vertente “*Mechanical APDL*” e seleccionar a opção “*Read Input from*” presente na Figura D.19.

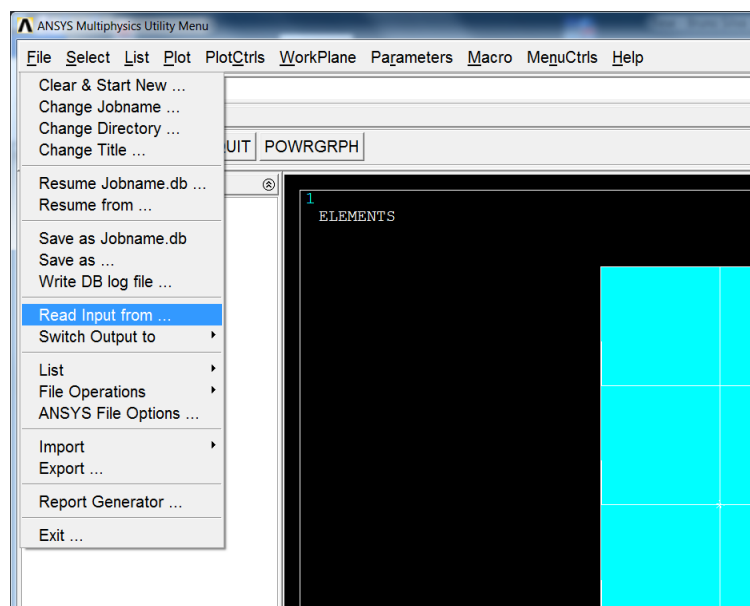



Figura D.19 – Opção “*Read Input from*” do *Mechanical APDL*.

Pode contudo não efectuar a análise e retirar as listas que pretende do menu “*List*” presente na Figura D.20.

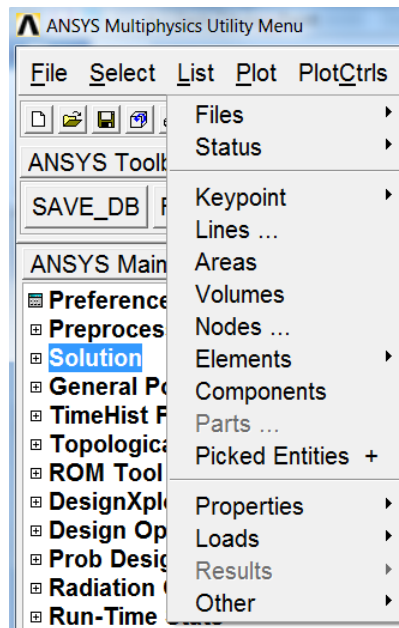



Figura D.20 – Menu “*List*”.

Se quiser efectuar nova análise nesta vertente “*Mechanical APDL*” deve abrir o menu “*Solution*” à esquerda e escolher a opção “*Solve*” e em seguida “*Current LS*” como se encontra na Figura D.21. Em seguida aparecerá uma janela como a presenta na Figura D.21 ao qual deve seleccionar “OK” e a solução será executada.

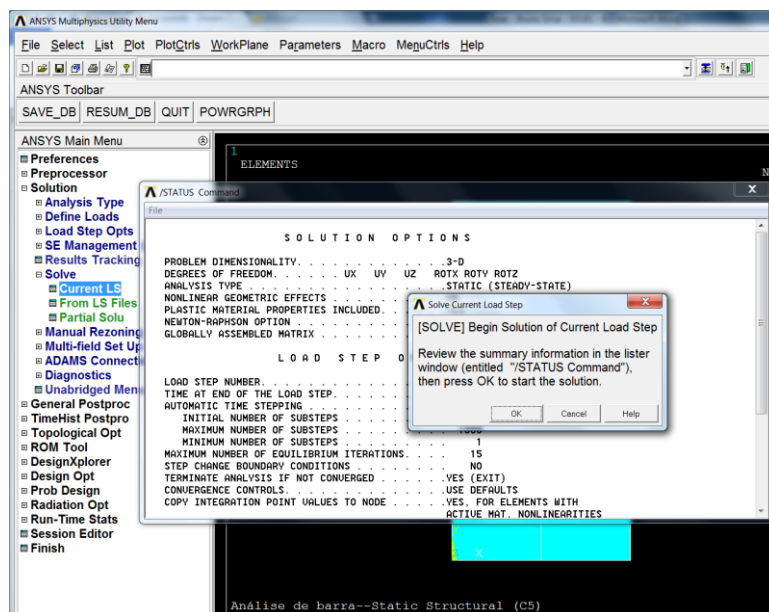



Figura D.21 – Execução de análise no *Mechanical APDL*.

Após efectuar a análise pode por fim retirar um texto de comandos efectuados pelo "*Mechanical APDL*", que funciona numa vertente mais voltada para a programação de modo a programar a análise da forma que pretende, ao invés do anterior interface gráfico. Para tal basta escolher a opção "*Write DB log file*" no menu "*File*" presente na Figura D.22.

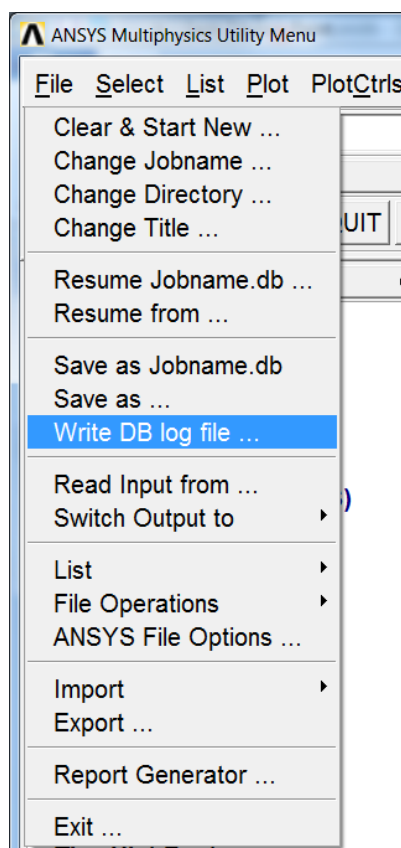
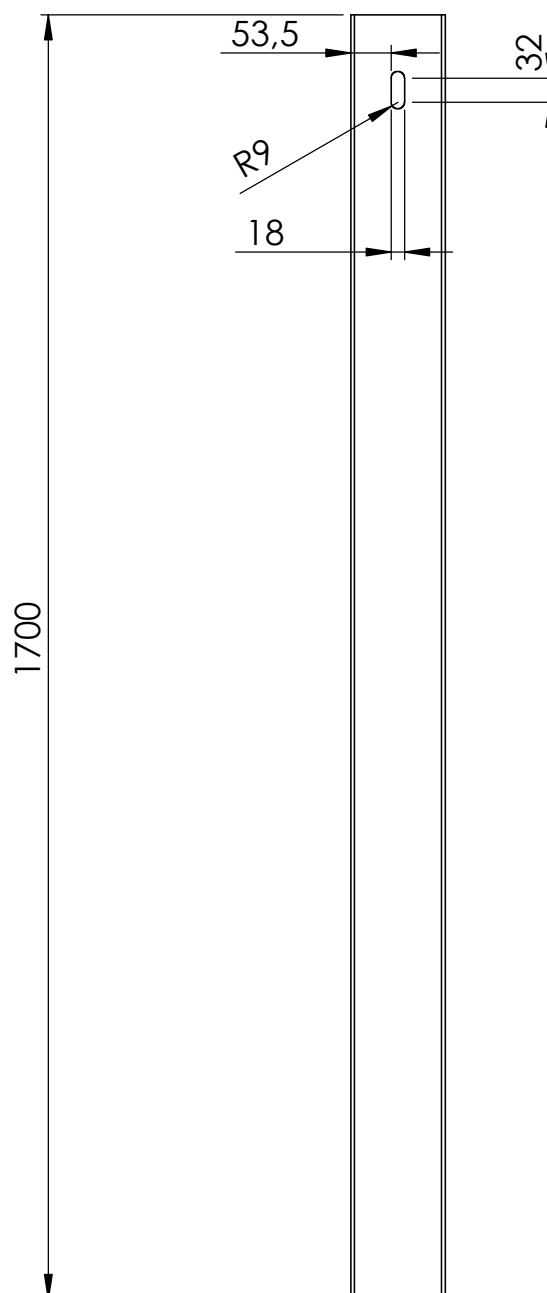
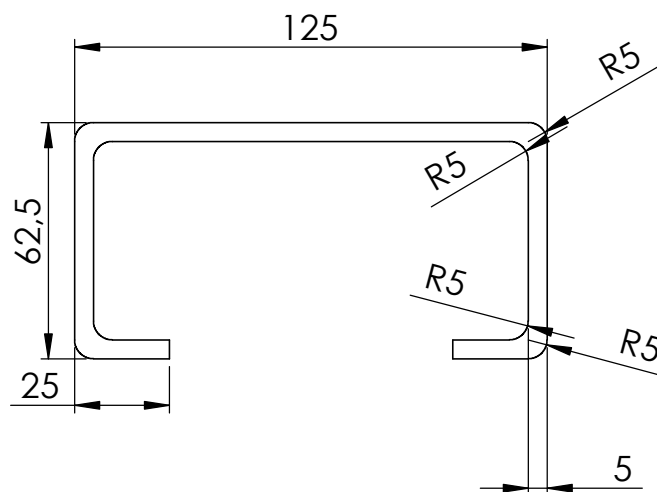
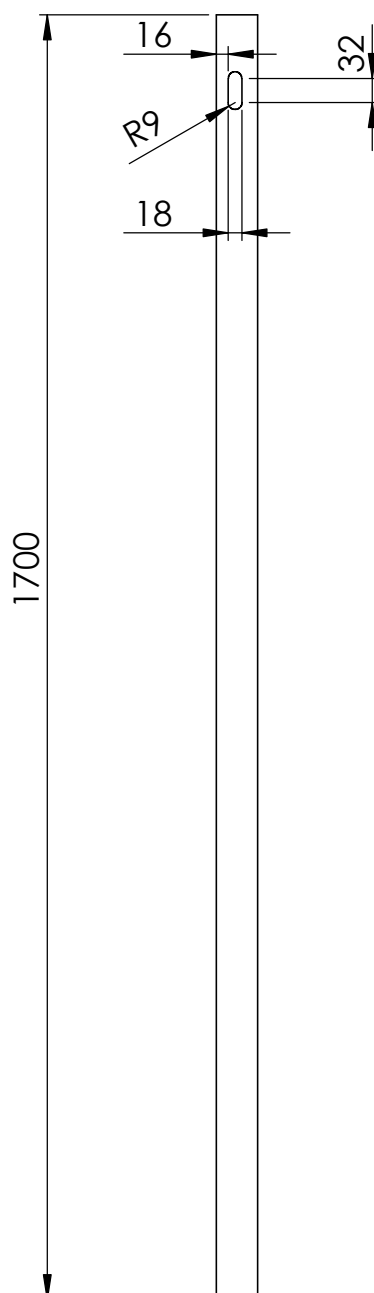
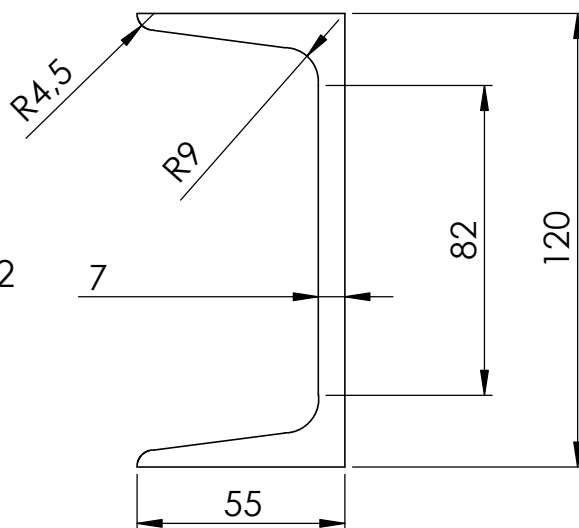
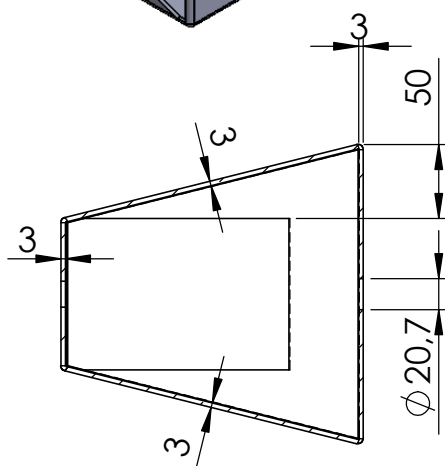
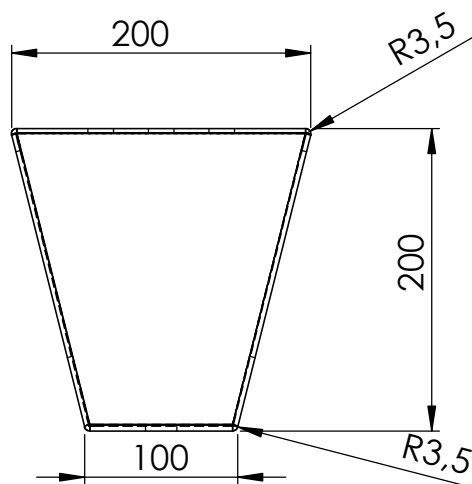
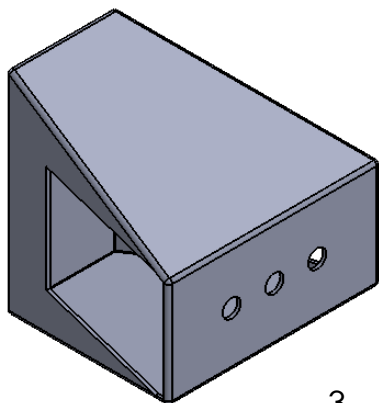
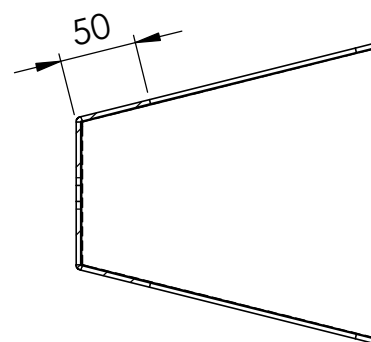
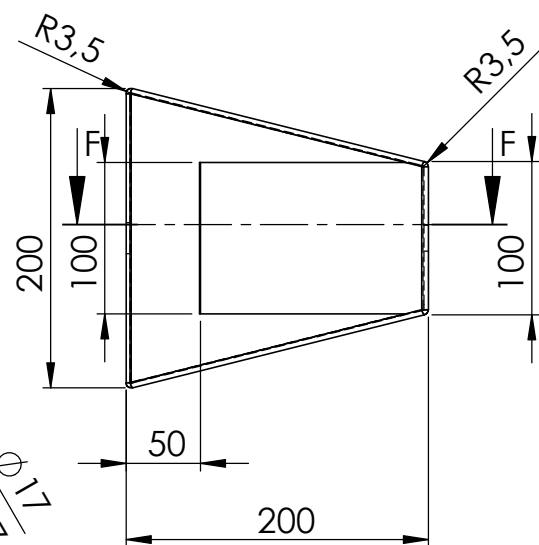
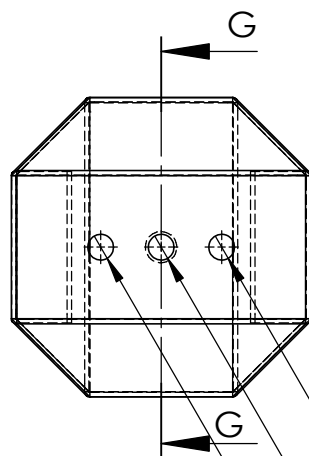



Figura D.22 – Opção "*Write DB log file*" no menu File.

Em seguida guarda o ficheiro resultante da opção presente na Figura D.22 e pode abrir mesmo através do programa "Bloco de notas".

Anexo E – Desenho técnico do prumo C125

Vista inferior à escala 1:2
125
R5
R5
62,5
R5
R5
25
5
53,5
32
R9
18
1700
Nome
Data
Título
Desenhado por
Bruno Silva
31/10/2011
Prumo C125
Escala
1:10
A4

Anexo F – Desenho técnico do prumo UPN120

R4,5
R9
Vista inferior à escala 1:2
7
82
120
55
16
32
R9
18
1700
Nome
Data
Título
Desenhado por
Bruno Silva
31/10/2011
Prumo UPN120
Escala
1:10
A4

Anexo G – Desenho técnico do espaçador tipo II

200
R3,5
200
100
R3,5
3
50
3
3
3
⌀20,7
Vista de Corte G-G
G
G
⌀17
⌀17
⌀17
R3,5
R3,5
F
F
200
100
100
50
200
50
Vista de Corte F-F
Nome
Data
Título
Desenhado por
Bruno Silva
31/10/2011
Espaçador tipo II
Escala
1:5
A4

Anexo H – Artigo para conferência

STUDY OF THE CONNECTIONS BEHAVIOUR IN ROAD SAFETY BARRIERS

Bruno Silva[1(*)], José Meireles[2]
[1, 2]Mechanical Engineering Department (DEM), University of Minho, Guimarães, Portugal
[(*)]*Email:* baess@sapo.pt

ABSTRACT

This work studies the connections behaviour of road safety barriers. There are performed static numerical analyses for two components individually, the post, and the spacer. The finite element method software in use is the ANSYS Workbench. To validate the software analyses in the plastic domain, it is primarily represented an analytical solved problem, that obtain a successful result in the numerical analysis. Finally there are made the numerical analysis with the C125 (DIN 10162) post and the spacer in order to understand their behaviour with a different range of forces. The final displacement-force curve can be used in dynamic analyses or related with European Standard 1317, which in a singular case can identify the vehicle impact speed through the displacement present in the post and spacer.

INTRODUCTION

The metallic road safety barriers have the objective to deform in order to absorb the kinematic energy of the vehicle crashing. This barriers behaviour is important to minimize the damage and avoid other collisions. The first barrier found by research in the Espacenet, the online search website from the European Patent Office, is from 1923, with the name of “Road Guard”, patented by J. A. Lawson (Lawson, 1923).

This work focus in the metallic barriers constitute with the post, spacer and the longitudinal beam, with the w-beam, as the most common. All these barriers should be in accordance with the European Standard 1317, “Road Restrain Systems”, that certifies it as capable of contain different levels of impact. However, from the observation of real crash scenarios it is possible to claim that these barriers don’t work as expected. The first problem is that the barrier doesn’t break the joint between the post and the spacer, following the vehicle in motion as expected. Contrary to this, in some scenarios the vehicle passes over the barrier. This might be related with the second problem, the post constrain. The post isn’t properly fixed into the ground.

The M16 bolts, that connect the w-beams between themselves, never break (Engstrand, 2000). However the bolt connections between spacer and beam or between beams can fail by shear or bolt tear (Bayton, *et al.*, 2009).

From this metallic barrier, here are presented the studies made in the post C125 and the spacer in order to understand its behaviour with different forces. With this data are obtained the force-displacement curves, than can be characterized with a tendency line represented by a polynomial equation. Relating with the European Standard 1317-1 equation, it may be possible to understand in a singular case, the impact characteristics from the post and spacer displacement.

MATERIAL DESCRIPTION

The material description considered in the numerical analyses is obtained from a real spacer component used in road safety barriers. From this component, similar to the ones present in figure 1 are retired three specimens to be tested in a tensile testing machine, “Instron 8874” capable of producing 25 kN of nominal force. The specimens are obtained from the top straight face, with no deformation.

a) b)

Fig.1 Road safety barriers’ spacer tested.

The first two specimens aren’t able to produce a correct tensile test. The 25 kN of force isn’t enough to break the specimens cross section with a thickness of 3,22 mm for 20 mm and 19 mm width for the first two tests. The last test, with 17,86 mm width, finally produce correct results, with a maximum force of 25 453 N registered.

For a l_0=100 mm are obtained the follow results:

- Young modulus (E) = 161 GPa;
- Tensile yield strength, 0,2% (σ_c) = 361,76 MPa;
- Tensile ultimate strength (σ_r) = 442,58 MPa;
- Deformation to collapse = 15,6%.

It was expected to obtain results close to S235JR steel, according to EN 1317-5, which has tensile yield strength of 235 MPa. According to Araújo, it’s possible to expect a S275JR steel (Araújo, 2008), and finally, according to Bayton, it’s possible to expect a S275 steel (Bayton, *et al.*, 2008), which both present a tensile yield strength of 275 MPa. The table 1 shows the chemical constitution for these four materials.

Table 1 Steels chemical composition. Maximum values.

Tested material						
Chemical Element	C	Mn	P	S	Si	Cr
%	0,130	0,506	0,008	S < 0,010	0,174	0,012
S235JR						
Chemical Element	C	Mn	P	S		N
%	0,190	1,500	0,045	0,045		0,014
S275JR						
Chemical Element	C	Mn	P	S		N
%	0,240	1,600	0,045	0,045		0,014
S275						
Chemical Element	C	Mn	P	S	Si	N
%	0,250	1,600	0,050	0,050	0,500	0,012

The steels use to have a Young modulus near to 200 GPa too, so a chemical analysis was necessary to identify the tested specimens. The chemical analyses demonstrate that the material tested has less percentage of Carbon, about 1/3 of Manganese, 1/5 of Phosphorus and less than 1/4 of Sulphur. The Silicon is about 1/3 of the present in S275. However the chemical analysis confirmed that it's a steel with 99,2% of iron and 0,13% of carbon.

As a real tested material, the characteristics presented before are the ones inserted in the finite element software, used in numerical analyses performed, present ahead.

From the stress-strain curve obtained in the tensile test, it's achieved the real stress-strain curve, through logarithmic equations and specimen measures, required to introduce in the software. The real curve (figure 2) showed a tensile ultimate strength of 489,29 MPa and an deformation to collapse of 68%, with a final stress (σ_f) of 590,10 MPa. The Poisson coefficient (υ) was considered as 0,3 along with the density (ρ) of 7860 kg/m^3.

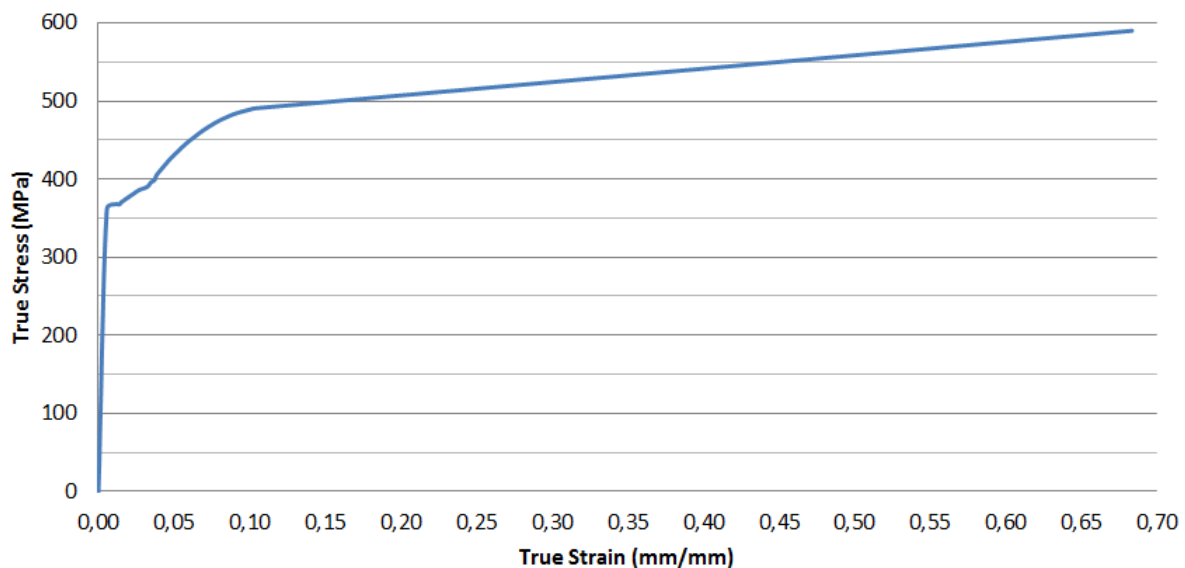



Fig.2 True stress-strain curve.

PLASTICITY

The plastic behaviour of description is more complex than the elastic behaviour. It describes the final shape of a material. In material like the construction steel used in this work, the plasticity isn't possible to predict, even if the stress-strain curve is known, different structures will achieve different results, unlike the elastic behaviour, where is known that the final shape will be the same as the initial. After the tensile yield strength the shape deformations will remain in the structure, only the elastic behaviour is recovered.

Plasticity involves among other characteristics, anisotropy (which considers that a physical propriety varies with the direction) resulting in different behaviour and deformations. In contrary, there is isotropy (that considers similar physical proprieties in all direction) resulting in same behaviour and deformations in any direction.

Deformation is a consequence of energy absorption, and that is the major characteristic that makes plasticity so important. Contrary to elasticity, plasticity can absorb a much more energy. In steel like this, a ductile material, the energy absorption can almost ignore the

elastic capacity. The energy absorption capacity can be measured by the area beneath the stress-curve line. In strain involving definitive deformation, the energy absorbed is called tenacity, which varies from low values in brittle materials to high values in ductile material like steel. In deformation like the one present in road safety barriers, the tenacity is important in order to absorb the kinematic energy for vehicle collisions.

In this study, the isotropic behaviour is considered because it's a good starting judgement and still provides valid results. The steel used and described before, presents as most of steels, a ductile behaviour with high tenacity.

SOFTWARE VALIDATION

In order to validate the software for finite element plastic analyses, is selected a solved plastic analysis exercise. The problem is taken from the ANSYS Verification Manual, with the name of WBVMMECH029. The theory behind the solution to this problem is based in Timoshenko formulation (Timoshenko, 1975).

This problem uses Imperial System units, and in order to avoid converting approximations was decided to keep it, in the problem reproduction.

A beam with a rectangular cross section area of b*h is constrained in one cross section face and subjected to a moment introduced in the opposite face. The elastic-perfectly plastic material is represented by a bilinear stress-strain curve, with a Young modulus (E) of $3\text{x}10^{-7}$ psi and tensile yield strength (σ_c) of 36 000 psi.

a) b)

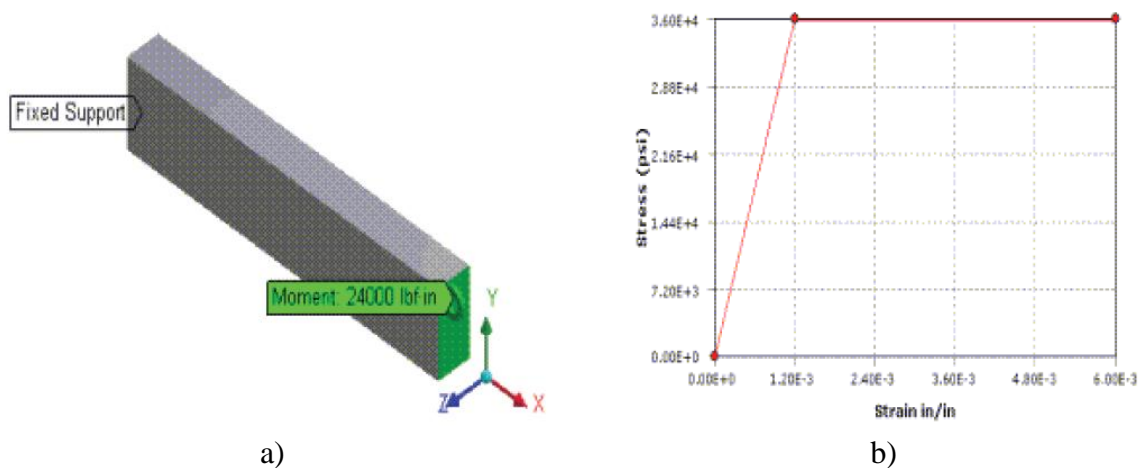



Fig.3 Images from problem WBVMMECH029.

a) Beam boundary conditions. b) Material stress-strain curve.

The text indicates an element mesh size of 0,5 in. There are applied three different moments, 24 000, 30 000 and 36 000 lbf.in, that lead the beam to the yield strength values, plastic deformation and collapse in this order. These three moments result from the Tymoshenko formulation present in equation (1) where is obtained the moment that generates the initial plastic deformation (M_c).

$$M_c = \sigma_c \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \qquad (1)$$

With equation (2) is obtained the moment that leads the structure to total cross section plasticity (M_{lim}).

$$M_{lim} = \sigma_c \cdot \frac{b \cdot h^2}{4} \qquad (2)$$

The intermediate value represents a middle range moment to verify the stress results still follow the material stress-strain curve. There is a ratio between moments where M_{lim}=1,5*M_c.

In the software, due to the material characteristics it should be obtained an Equivalent Stress of 36 000 psi for the first two moments and a non-convergent solution for the highest moment applied, which must lead the beam cross section to full plasticity. The first simulations following the problem indications lead to near results, but not the ones expected, especially in the moments ratio that were near to 1,3 in spite of the 1,5 expected.

Finally is possible to validate the software through the element definition of the SOLID186 element, choosing the Full Integration Scheme, increasing the integration points to 14 in spite of the reduced 8 automatically chosen. It is necessary to make a blend (0,025 in radius) in the edges of the face where the moments are applied, in order to avoid erratic deformation. The results are present in table 2.

Table 2 WBVMMECH029 exercise results that validate the program.

Ratio M_c	Moment applied (lbf.in)	**Results (psi)**		Error (%)
		Theoretical	**Numerical**	
		Equivalent Stress	Equivalent Stress	
1	24 000	36 000	**36 069**	0,2
1,25	30 000	36 000	**36 000**	0
1,5	36 000	non-convergent	**non-convergent**	

Comparing the theoretical to numerical results present in table 2, it’s possible to see a small error for first moment of 0,2%, no error for the second moment and non-convergent solution for last moment, as expected. The moments ratio achieved is 1,48, near the theoretical 1,5. It’s now possible to trust the results obtained from plastic analyses in ANSYS Workbench.

NUMERICAL ANALYSES

After the software validation it’s now conceivable to analyse the post and the spacer as desired. The first analysis, tests the post C125. The post total length is 1700 mm and 1050 mm of them are under the ground line. In order to reproduce the soil constrain (A), considering a solid foundation without movements, it was addicted a cylindrical form in the structure, as it’s possible to see in figure 4 (see the axis system). It’s also applied a force (B) in the normal direction to the C125 post face, where the spacer is in contact.

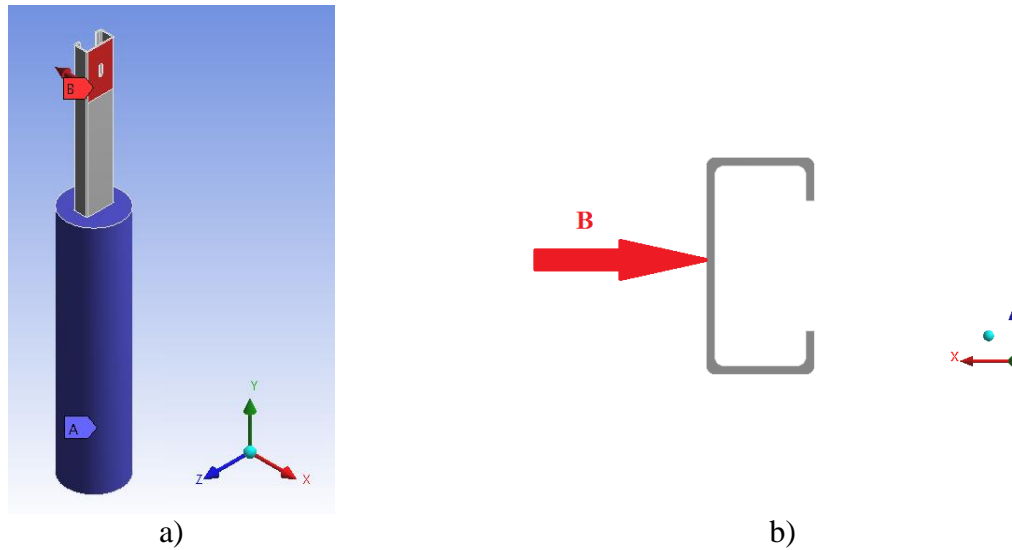



Fig.4 Post C125.

a) Boundary conditions. b) Direction of force applied to post.

The displacement present in the results ahead in this paper is divided in two components, horizontal (d_H, related to x axis) and vertical (d_V, related to y axis) to the initial position. The displacement is the most important information obtained from post C125, to be compared with the equation present in EN 1317-1. The stress analysis is also important to understand the location of the maximum equivalent stress and consequently the initiation of plasticity until fracture/material collapse.

The second analysis studies the spacer. This structure have similar boundary conditions, a constrain (A), representing the contact, as fixed, with the post, and a force (B) applied in the opposite face, where the longitudinal beam is fixed as it's possible to see in figure 5 (see the axis system). A 3,5 mm radius fillet is present in all edges between contact faces.

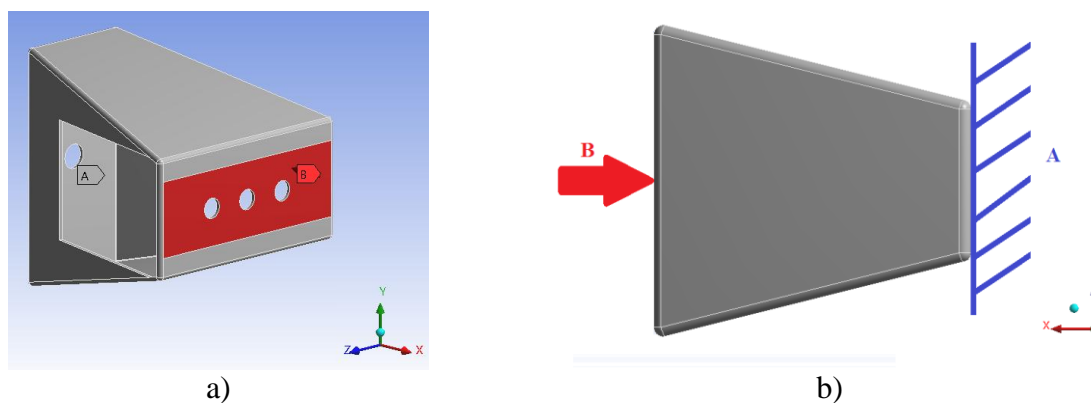



Fig.5 Spacer.

a) Boundary conditions. b) Direction of force (B) applied to the spacer.

Like for the post C125, the analyses in spacer describe the displacement and stress behaviour. However for spacer the most important information is the stress behaviour in order to locate the initiation of material collapse.

The element used in both the structures is the SOLID187. This element is a high order 3D element, 10-node with 3 DOF per node. It has plasticity, large deflection and large strain capabilities and is well suited to modelling irregular meshes.

The mesh was left as coarse because both the numerical analyses reveal correct behaviour and results with it.

EXPERIMENTAL ANALYSIS

A real spacer is subjected to an experimental analysis, where it is compressed in a tensile test machine, "Dartec M1000 R/D". The spacer tested in not the same from where it was taken the three specimens that described the material. The one tested is present in figure 1 and 6, b. A 63,5 mm width bar (figure 6, b) is applied in the force face (figure 5, a), and in order to be able to compare results, the area where the force is applied is the same in numerical analyses.

a)

b)

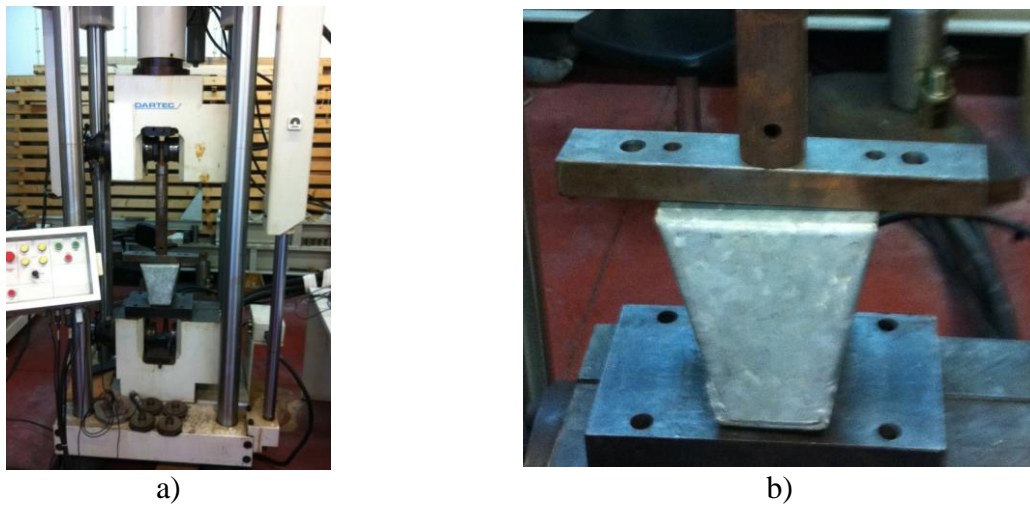



Fig.6 Spacer compress test.

a) Test machine Dartec M1000 R/D. b) Spacer with force bar applied.

The test was executed under quasi-static conditions, with consequently slow deformation, in way to be able to compare with the static analyses in ANSYS. The test was limited to a maximum displacement introduced by operated, in order to be sure of verifying fracture. In this case is not possible to compare displacement values. The displacement wasn't the objective to achieve in this test but the maximum force and the fracture location.

RESULTS AND CONCLUSIONS

For the post C125 it's done a displacement and stress analyses. The force is applied in the normal direction to the post face, in the area where it contacts with the spacer. The results of the force-displacement curve for post C125 are present in figure 7. The 2 curves show the horizontal (d_H, continuous line) and vertical displacement (d_V, dashed line). The numerical analyses proceeded, identified a maximum force of F=178 500 N until the C125 post enters in non-convergence results.

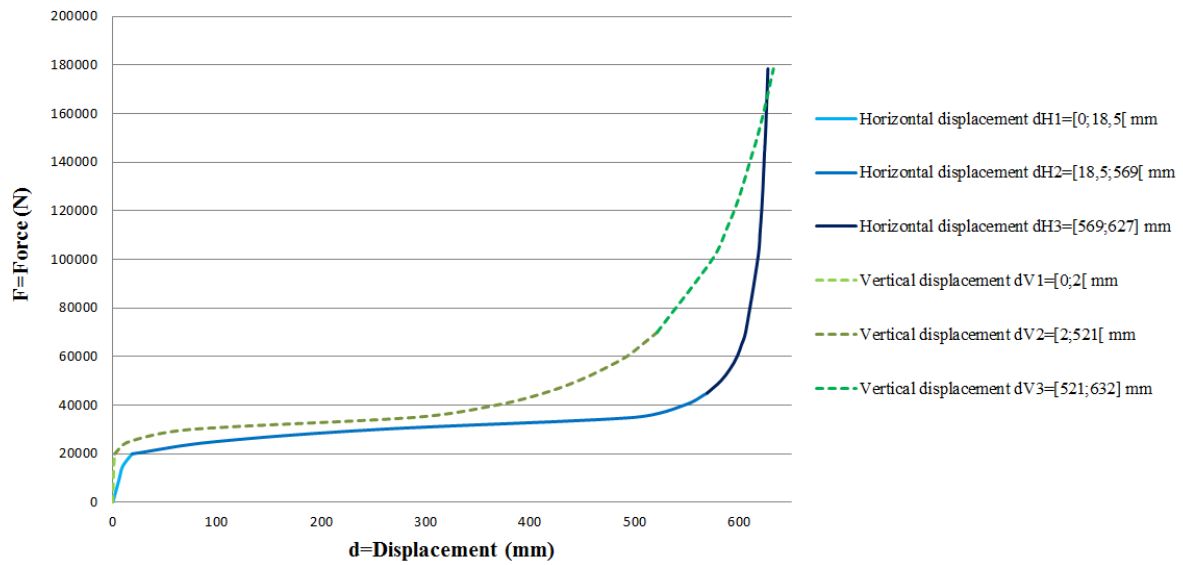



Fig.7 Displacement-force curve. Horizontal and vertical displacement.

Each kind of displacement is divided in three curves, with an interval of displacement associated, as it's possible to see in the right side of figure 7. For each displacement is associated one of the follow equations, taken from the respective tendency lines of each force-displacement curves. These equations (3) to (8) should be used in order to obtain force, depending of displacement measured, choosing if it's preferable to measure horizontal (d_H) or vertical displacement (d_V) and finally verifying the values in order to choose the correct interval and corresponding equation (verify displacement intervals in the right side of figure 7).

$$F = -\left(48{,}105 \cdot {d_{H1}}^2\right) + \left(1993{,}4 \cdot d_{H1}\right) - 308{,}29 \tag{3}$$

$$F = \left(1 \times 10^{-8} \cdot {d_{H2}}^5\right) - \left(2 \times 10^{-5} \cdot {d_{H2}}^4\right) + \left(0{,}0084 \cdot {d_{H2}}^3\right) - \left(1{,}7554 \cdot {d_{H2}}^2\right) + \left(187{,}22 \cdot d_{H2}\right) + 17084 \tag{4}$$

$$F = \left(9 \times 10^{-6} \cdot {d_{H3}}^6\right) - \left(0{,}0313 \cdot {d_{H3}}^5\right) + \left(44{,}845 \cdot {d_{H3}}^4\right) - \left(34211 \cdot {d_{H3}}^3\right) + \left(1 \times 10^{7} \cdot {d_{H3}}^2\right) - \left(3 \times 10^{9} \cdot d_{H3}\right) + 3 \times 10^{11} \tag{5}$$

$$F = -\left(6883{,}9 \cdot {d_{V1}}^2\right) + \left(23666 \cdot d_{V1}\right) - 236{,}04 \tag{6}$$

$$F = \left(2 \times 10^{-8} \cdot {d_{V2}}^5\right) - \left(2 \times 10^{-5} \cdot {d_{V2}}^4\right) + \left(0{,}0109 \cdot {d_{V2}}^3\right) - \left(2{,}5743 \cdot {d_{V2}}^2\right) + \left(276{,}69 \cdot d_{V2}\right) + 20236 \tag{7}$$

$$F = \left(6 \times 10^{-6} \cdot {d_{V3}}^4\right) + 0{,}027 \cdot {d_{V3}}^3 - \left(51{,}1 \cdot {d_{V3}}^2\right) + \left(28460 \cdot d_{V3}\right) - 5 \times 10^{6} \tag{8}$$

The figure 8 presents the final deformation, for F=178 500 N, with the maximum equivalent stress (547,05 MPa) location.

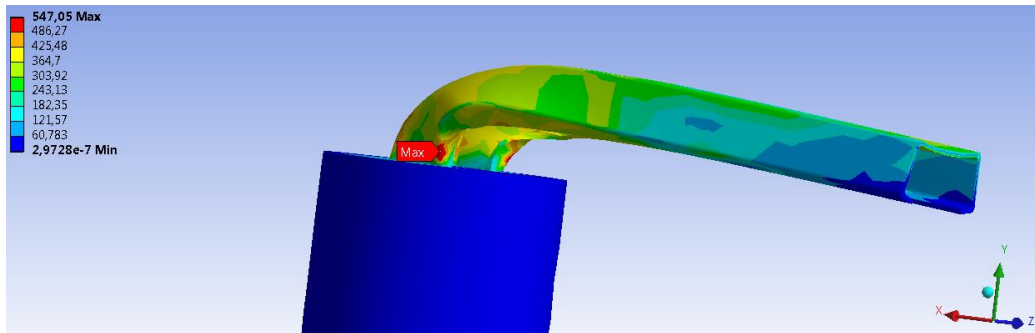



Fig.8 Final shape of post C125 and maximum equivalent stress location for F=178 500 N.

As it is possible to see in figure 8, the post behaviour deforms near to soil fixed support, where the maximum stress is located. The C125 steel profile deforms correctly too, so it's possible to consider a valid mesh.

The spacer behaviour is also analysed. In this case, the displacement is represented by in a single value. The stress analysis is the most important, in order to identify the initial material collapse location, which can be compared with the experimental analysis. The maximum force supported by spacer before non-convergence results is F=31 500N. The maximum displacement observed measured d=9,96 mm and the formulation provided by the force-displacement curve tendency line is present in equation (9).

$$F = (86{,}346 \cdot d^3) - (1881{,}1 \cdot d^2) + (13366 \cdot d) - 346{,}19 \quad (9)$$

The maximum equivalent stress measured for F=31 500 N was 459,75 MPa. Its location is present in figure 9.

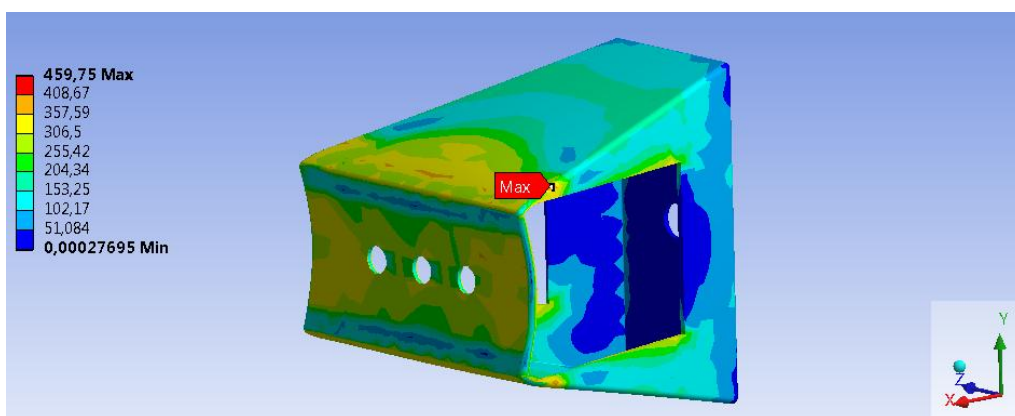



Fig.9 Final shape of spacer and maximum equivalent stress location for F=31 500 N.

The figure 9 is important in order to compare the numerical results with the experimental ones. With this location is possible to understand that the material should start to collapse there. For spacer is possible to compare results with experimental analysis. The experiment lead to initial fracture, located in figure 10 b.

a)

b)

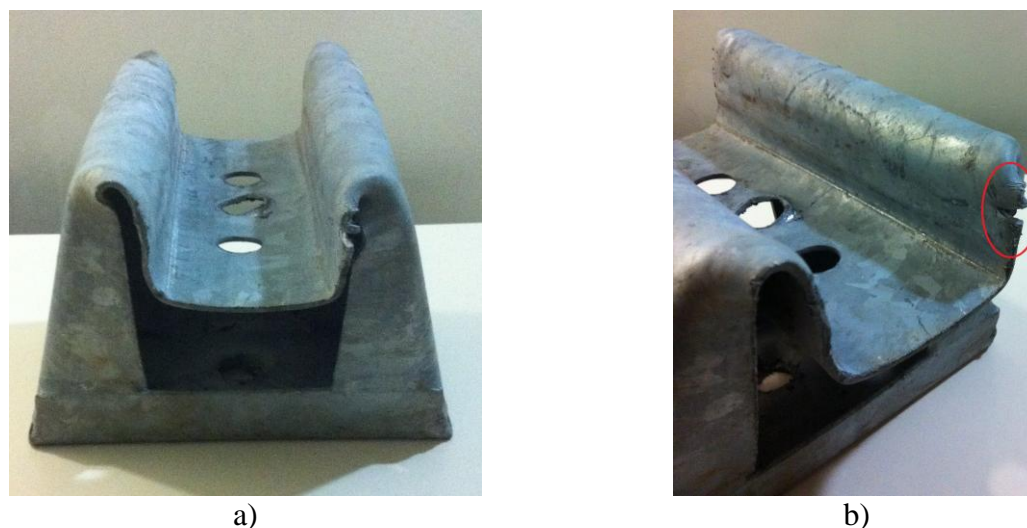



Fig.10 Spacer shape after experimental analysis.

a) Final shape. b) Fracture initiation.

Comparing the figure 9 with figure 10 b, is possible to verify that the maximum equivalent stress is located in the same place of the initial collapse. The force-displacement curve obtained from the experimental analysis is present in figure 11, that indicates a maximum force of F=37 786 N.

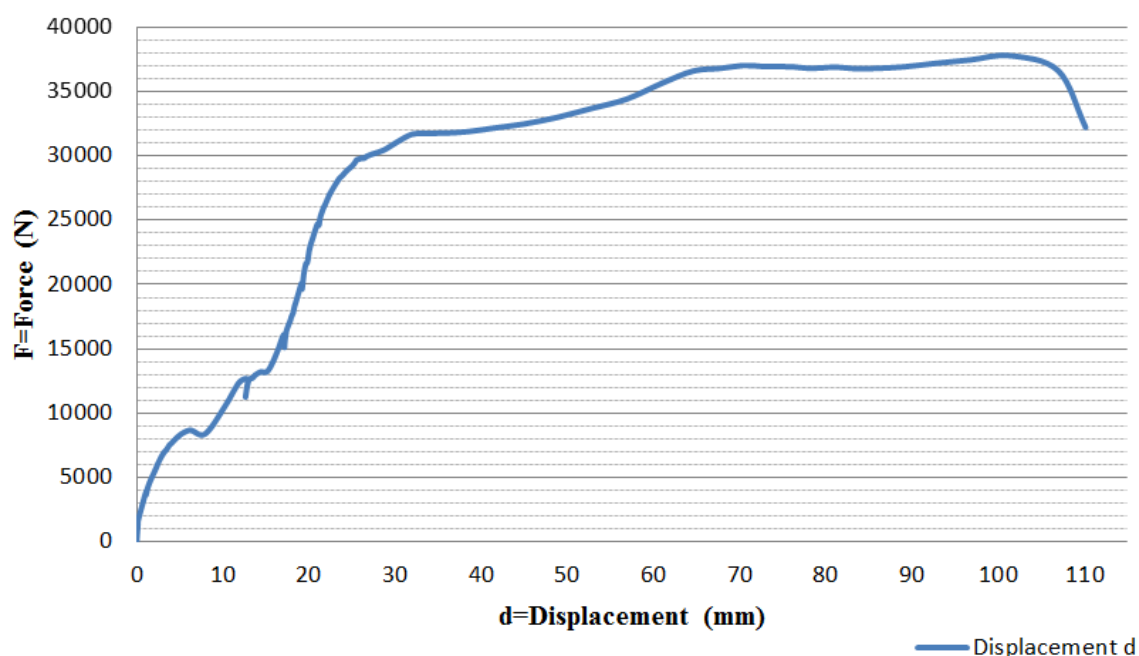



Fig.11 Force-displacement curve from spacer experimental analysis.

These results indicates a valid numerical simulation, with some difference in forces values, from 37 786 N to 31 500 N that can be related to different material proprieties and different geometrical conditions, since the spacers aren't precisely constructed despite of presenting the

same general dimensions of the numerical constructed. The spacer construction involves weld and non-connected faces, ignored in numerical modelling. Despite these differences, the resulted forces are not much different, staying in a same sort of forces.

Both structures can be related to equation present in EN 1317-1, however, the spacer role isn't to absorb energy in full intention, in fact the deformation produced in it can be ignored if compared with the post C125. According to EN1317-2, in impact, the joint between the spacer and the post should break, following the car in motion with the longitudinal beam, supported by other posts and spacers of the near road safety barrier, working as a multibody energy dissipation system.

Relating the equations (3) to (8) with the equation present in the EN 1317-1 (in order to velocity) it's possible to understand the impact velocity (v) of a known vehicle that collides with the barrier right in the post location (equation (10)). It's possible to include equation (9), however it's not possible to understand the deformation behaviour of the two structures together. The spacer deformation is many times smaller than the post, and is better to be ignored in this calculus.

$$v = \frac{\left[\frac{F \cdot 2 \cdot [c \cdot \sin\alpha + b \cdot (\cos\alpha - 1) + S_b]}{m}\right]^{1/2}}{\sin\alpha} \qquad (10)$$

It's easier to understand the equation (10) with the figure 12.

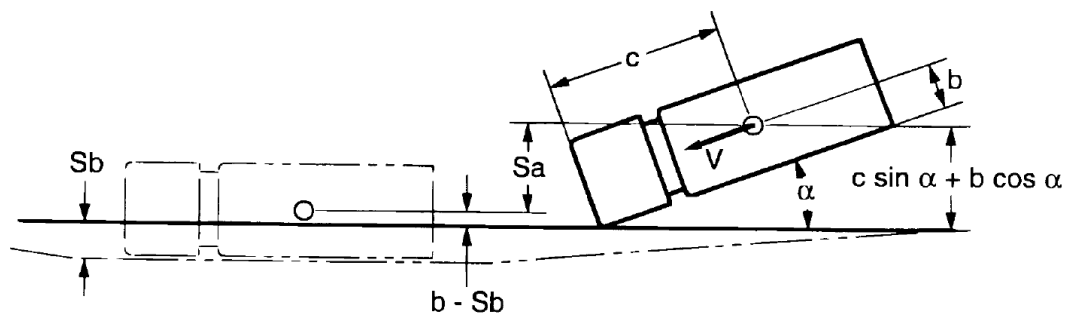



Fig.12 Equation (10) description from EN 1317-1.

These results may not be valid for great impacts but for low velocity impacts with low displacement, it can achieve realistic results, just need to use equations (3) to (8), depending on displacement measured and obtain force values. Knowing the vehicle characteristics, beam deflection and impact angle, considering a force applied normal to post location, it's finally possible to identify the vehicle velocity.

Finally this data and formulation can be used for further analyses including dynamic behaviour and all structures assembled together, since is now know its behaviour with trust in software results, which includes a successful comparison with a real experimental quasi-static analysis.

The metallic road safety barriers are the most common barriers, due to its cheap price, however they aren't the most efficient (Lima, 2006). Studies like this can help to improve and develop better metallic road safety barriers, but their real capacities are limited.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the Centre for Mechanical and Materials Technologies (Centro de Tecnologias Mecânicas e de Materiais – CT2M).

REFERENCES

Araújo GJS, Estudo analítico do tipo de barreiras de protecção rodoviárias. Universidade do Minho, 2008.

Bayton DAF, Jones TB, Fourlaris G. Analysis of a safety barriers connection joint post-testing. Materials and Design, 2008, 29, 915-921.

Bayton DAF, Long R., Fourlaris G. Dynamic responses of connections in road safety barriers. Materials and Design, 2009, 30, p. 635-641.

British Standards Institute. BS EN 1317-1-2-5: Road restraint systems. London: BSI Publications; 1998.

Engstrand KE. Improvement to the weak-post w-beam guardrail. Worcester Polytechnic Institute, 2000.

Lima HMP, Comportamento funcional e estrutural das barreiras de segurança. Universidade do Porto, 2006.

Timoshenko S. Resistência dos Materiais, Vol. II. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1975.

United States Patent Office. US 1449518: Road guard. United States; 1923.